

SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES PARA EL CONTROL INTELIGENTE DE SEMÁFOROS MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

Héctor Rafael Orozco Aguirre

Universidad Autónoma del Estado de México

hrorozcoa@uaemex.mx

Saul Lazcano Salas

Universidad Autónoma del Estado de México

slazcanos@uaemex.mx

Victor Manuel Landassuri Moreno

Universidad Autónoma del Estado de México

vmlandassurim@uaemex.mx

Resumen

Una de las grandes problemáticas a resolver en las grandes urbes es la relacionada con la sincronización de semáforos para agilizar y mejorar el tráfico vehicular. En este trabajo, se presenta un nuevo modelo cuya aportación es servir como un esquema de ajuste de tiempos en semáforos empleando un sistema de control inteligente basado en agentes autónomos, buscando balancear los tiempos de espera en luz roja y de siga en luz verde para agilizar el flujo sobre cruceros. Se emplea una topología Manhattan para representar dos cruceros viales en una red vial de 7 calles, y la lógica difusa es aplicada para el ajuste de los tiempos de los semáforos tomando la densidad o congestión de tráfico vehicular. Esta red fue modelada y simulada en la plataforma AnyLogic.

Palabras Claves: AnyLogic, control inteligente de tráfico, lógica difusa, semáforos, sistemas multiagente.

Abstract

One of the main problems to be solved in the big cities is related to traffic lights synchronization in order to speed up and improve vehicular traffic. In this paper, a

new model is presented, which contributes to provide a scheme of time adjustment on traffic lights using an intelligent control system based on autonomous agents, seeking to balance waiting times in red light and follow times in green light, with the intention of speeding up the vehicular flow on vehicular cruises. A Manhattan topology is used to represent 2 road intersections in a road network of 7 streets, and fuzzy logic is applied to adjust times of traffic lights taking the vehicular traffic density or congestion. The road network was modeled and simulated on the AnyLogic platform.

Keywords: *AnyLogic, fuzzy logic, intelligent traffic control, multiagent systems, traffic lights.*

1. Introducción

La historia del uso y evolución del semáforo se encuentra muy ligada al desarrollo mismo de la industria automotriz. Actualmente, el tráfico vehicular se ha vuelto un problema muy fuerte en las ciudades, generando situaciones como contaminación, congestionamiento, tiempos de traslado elevados en distancias cortas, entre otros como estrés en los conductores y pasajeros de las unidades de transporte. En este sentido, una alternativa de solución pasa a través de un control adecuado de sincronización y autorregulación en los tiempos de las luces de semáforos. Este control se realiza de manera general basado en dos tendencias: la primera de ellas es un control pasivo o estático, en donde los semáforos se temporizan de acuerdo a criterios preestablecidos. La segunda tendencia es realizar un control activo, es decir, un control en donde la temporización pueda reajustarse en tiempo real acorde a las condiciones de tráfico, siendo esta la explorada en este trabajo.

Bajo el esquema de control activo, se siguen diversas líneas de trabajo tal como la observada en [Moghaddam, 2015] en el que se propone el control de un semáforo en un cruce, donde el ajuste de tiempos de este es llevado a cabo con control difuso Q-learning. El semáforo analiza las condiciones de tráfico en sus trayectorias y de este modo va realizando el ajuste de los tiempos y aprendizaje de diversas condiciones de tráfico.

La propuesta realizada en [Rashid et al., 2015] realiza el modelado del tráfico ya no como automóviles individuales sino como grupo, en el cual se analizan datos como velocidad promedio del grupo y distancia entre los autos, además de que los autos pueden estar moviéndose entre diferentes grupos. Pondera datos como tamaño del grupo, velocidad promedio de este y posible tiempo de espera para el control de las luces. Emplea una topología Manhattan en su modelado, consistente en 6 cruces de avenidas [Khasnabish, 1989].

El trabajo realizado por [Alkandari, 2015], propone un sistema de control basado en lógica difusa basado en la cantidad y velocidad de los vehículos, con la particularidad que puede hacer detección de posibles colisiones entre los mismos y tomar decisiones en consecuencia. El trabajo propuesto por [Rosyadi, 2016] se caracteriza por tener como objetivo la optimización de tiempos de espera en los cruces empleando algoritmos colaborativos basados en Q-learning para el control de los semáforos en sus simulaciones.

Sobre la línea de optimización de tiempos de espera, se encuentra el trabajo de [Hatri, 2016], en el cual emplean un algoritmo multiobjetivo enfocado a minimizar los tiempos de espera en cruces y maximizar la velocidad de grupo de automóviles, de manera simultánea. Emplea un algoritmo Q-learning combinado con un algoritmo de optimización de grupos de partículas.

Una tendencia diferente para el control de semáforos es la propuesta en [Fleck, Cassandras, 2016], en donde emplean un análisis infinitesimal de perturbaciones bajo el modelado de un proceso estocástico como herramienta para el control de las luces, en donde el modelo se alimenta con datos en tiempo real. Sin embargo, el escenario bajo el cual se analiza el comportamiento del algoritmo es únicamente un cruce con dos semáforos.

Otra vertiente muy importante para el control de semáforos son las propuestas basadas en hardware, como el trabajo de [Kuzminvkh, 2016], el cual se enfoca en priorizar el paso de unidades como ambulancias y servicios policiales. Una vez trazada la ruta de la unidad de auxilio hacia su destino, se alteran los tiempos de semáforos pertenecientes a dicha ruta mediante una tarjeta especialmente construida para dicho fin.

Otra propuesta basada en un dispositivo hardware para el control de semáforos es la realizada en [Ghazal et al., 2016], en donde se propone el uso de un microcontrolador PIC el cual, mediante sensores infrarrojos, colecta datos del entorno (densidad de autos, velocidades) y ajusta los tiempos del semáforo en consecuencia.

El trabajo presentado en [Kumaar, 2016] propone el uso de un microcontrolador PIC para monitorear la densidad de tráfico y reajustar los tiempos del semáforo, con la diferencia de que propone el uso de una pluma y una alerta auditiva para que los autos no sobrepasen el paso peatonal una vez que el semáforo se pone en rojo. En esta misma línea [Zhang, 2016] propone el uso de un dispositivo de diagnóstico en los vehículos que proporcionan datos sobre la velocidad de ellos y a partir de las lecturas obtenidas, se propone un algoritmo en donde se busca que la velocidad de los autos en un cruce se reduzca lo menos posible.

Otro trabajo en esta vertiente es el realizado por [Younis, 2016] el cual propone el uso de tags RFID en los vehículos para que, por una parte, se puedan reajustar tiempos en semáforos si se trata de vehículos de emergencia o ambulancias y al mismo tiempo, detectar vehículos robados a partir de una base de datos de la policía; dicha base puede ser alimentada en tiempo real a partir de un mensaje de texto en una red GSM.

Por otra parte, en [Sivakumar et al., 2016] se propone la optimización de los tiempos en los semáforos partiendo de dos perspectivas: la primera es recolectar datos de tráfico desde puntos fijos en la infraestructura urbana y la segunda es recolectar datos desde los autos mismos, buscando en ambas propuestas que haya pocos datos que transmitir y en consecuencia, poca carga de procesamiento para lograr el control de las luces.

Otro trabajo que aborda el uso de recolección de datos desde la infraestructura urbana es el presentado en [Qi, 2016], en donde proponen un sistema de control en dos etapas: la primera controla la temporización en los semáforos y la segunda marca posibles direcciones con problemas de tráfico en cada cruce, buscando que los autos tomen otra ruta en lugar de la que ya está congestionada. Emplea una red de 8x8 nodos para su simulación.

Sin embargo, una de las desventajas de los algoritmos y planteamientos hechos en trabajos como [Moghaddam, 2015], [Alkandari, 2015], [Rosyadi, 2016], [Fleck, 2016], [Kumaar, 2016] es que la simulación se realiza empleando un sólo cruce y no se valida en un esquema más amplio. Por otra parte, el trabajo en [Kuzminvkh, 2016] únicamente considera situaciones excepcionales como ambulancias o vehículos de emergencia para reajustar los tiempos en semáforos, con lo cual no se soluciona la problemática de tráfico en su conjunto.

Bajo lo anteriormente dado, en este trabajo se presenta el control de semáforos dinámico empleando un sistema inteligente basado en lógica difusa, buscando autorregular los tiempos de semáforos tomando como punto de partida las tasas de congestión vehicular de las calles que convergen en cruces de una red vial. Este control se prueba en una simulación virtual de una red vial, que cumple con lo requerido para modelar una red de calles bajo las características y restricciones de una topología Manhattan [Chung, 1993], [Brassil, 1994].

Para verificar la validez del uso de lógica difusa como mecanismo de control de los tiempos, se analizan los resultados referentes al desahogo de los cruces buscando equilibrar de manera eventual el tráfico en los mismos, es decir, desahogar la congestión vehicular de manera gradual para que no sea saturada ni colapsada la red vial.

El presente artículo, muestra los métodos que fueron empleados para desarrollo del modelo propuesto (sección 2), resultados obtenidos (sección 3), los cuales son discutidos en sección 4; y finalmente, en la sección 5 se presentan conclusiones.

2. Métodos

El desarrollo de este trabajo se hizo en dos etapas:

- Modelo Difuso de Control de Semáforos.
- Diseño y Construcción de la Red Vial.

Primera Etapa: Modelo Difuso de Control de Semáforos

En este trabajo, la lógica difusa se empleó para crear un modelo difuso de control inteligente de semáforos que permitiera el autoadaptabilidad de estos a las

condiciones de tráfico vehicular existentes en los cruces, mediante un sistema lógico impreciso, basado en subconjuntos difusos por medio de variables lingüísticas de entradas y de salida. De tal modo, que el modelo basado en reglas es con el fin de tratar lo difuso de manera sistemática pero no del todo cuantitativa, debido a que las tasas de congestión vehicular no fueron tratadas como números, sino como conceptos representados mediante conjuntos difusos como “muy poco”, “medio” o “muy alto”, por mencionar algunos.

La lógica difusa se eligió debido a que utiliza principalmente dos conceptos: graduación y granulación, siendo estos el núcleo y características principales de la misma [Zadeh, 1994], por lo que la graduación significa que a todo dato al que se le emplea es o se le permite que sea graduado, en donde las fronteras entre un estado y otro no están definidas nítidamente, por otro lado, la granulación es el uso de palabras vistas como una forma de cuantificación difusa, en la figura 1 se observa la diferencia entre cuantificación y granulación, en donde se representa la granulación por medio de etiquetas lingüísticas como: bajo, medio, o muy alto, en donde, dichas etiquetas representan un valor cuantitativo.

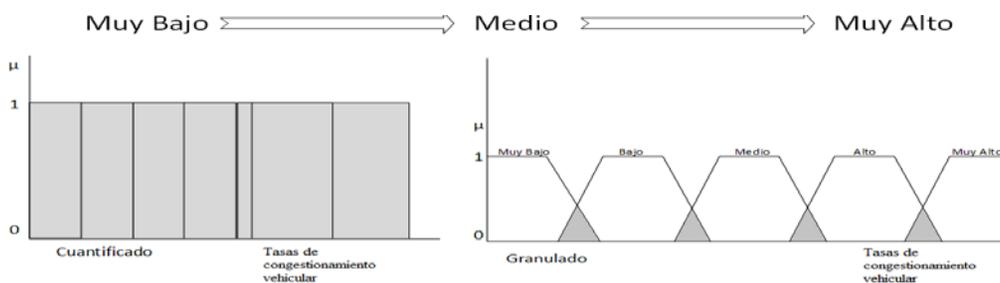


Figura 1 Graduación y granulación de las tasas de congestión vehicular.

La lógica difusa hace uso de la teoría de conjuntos difusos, con el fin de dar un grado de membresía o pertenencia a sus variables lingüísticas, lo que permite aceptar una membresía parcial a ciertos conjuntos, generalizando en cierta medida a la teoría de conjuntos clásicos [Chen, 2000]. En [Zadeh, 1994] se define a un conjunto difuso como “una clase de objetos con una continuidad de grados de pertenencia”. Dicho conjunto está caracterizado por una función de pertenencia, por lo tanto, la función asigna a cada objeto un grado de pertenencia, tal grado de pertenencia se encuentra dado por los valores dentro del rango de 0 y 1. Aunque

se puede hacer uso de diferentes funciones de pertenencia, en esta investigación se utilizó la función de pertenencia trapezoidal, toda vez que su principal ventaja es el margen de tolerancia alrededor del valor que se toma como más representativo del valor lingüístico asociado al conjunto difuso, así como el centro de gravedad del conjunto difuso, es decir, en su cima se tiene una pertenencia máxima de 1 en un conjunto para un rango de valores sin incertidumbre y en sus costados se tiene un grado de pertenencia que puede estar entre dos o más conjuntos para un rango de valores con incertidumbre.

Para llevar a cabo esta etapa, se realizaron los siguientes 4 pasos creando un archivo escrito en el lenguaje de definición de sistemas de inferencia difusos FCL [International Electrotechnical Commission, 2014] y usando el lenguaje Java mediante la biblioteca jFuzzyLogic [Cingolani, 2012]:

- *Recopilación de Datos para los Valores de las Variables Lingüísticas de Entrada y de Salida:* Tomando como base lo dado en [Aguirre, 2017], se vio que era conveniente manejar las tasas de congestión vehicular en cada calle, yendo de un valor 0 (el más bajo) al de 75 (el más alto), distribuyéndolas en 5 conjuntos difusos traslapados y mapeados a un rango de 0 a 1 como sigue:
 - ✓ Muy poco (vl: very low): 0 a 16, mapeo de 0 a 0.2133.
 - ✓ Poco (l: low): de 14 a 31, mapeo de 0.1866 a 0.4133.
 - ✓ Regular o moderado (m: medium): de 29 a 46, mapeo de 0.3866 a 0.6133.
 - ✓ Alto (h: high): de 44 a 61, mapeo de 0.5866 a 0.8133.
 - ✓ Muy alto (vh: very high): de 59 a 75, mapeo de 0.7866 a 1.
- *Fusificación de las Variables Lingüísticas de Entrada:* Una vez recopilados los datos, se definieron las variables y valores lingüísticos, así como las funciones de pertenencia para realizar una fusificación igual de las variables lingüísticas de entrada (las cuatro calles que convergen en un cruce de la red vial) s1, s2, s3 y s4, dando como ejemplo lo hecho para s1, acorde a lo siguiente, ver figura 2:

FUZZIFY s1

```

TERM vl := (0.0, 1) (0.1866, 1) (0.2133, 0);
TERM lo := (0.1866, 0) (0.2133, 1) (0.3866, 1) (0.4133, 0);
TERM me := (0.3866, 0) (0.4133, 1) (0.5866, 1) (0.6133, 0);
TERM hi := (0.5866, 0) (0.6133, 1) (0.7866, 1) (0.8133, 0);
TERM vh := (0.7866, 0) (0.8133, 1) (1, 1);
END_FUZZIFY
    
```

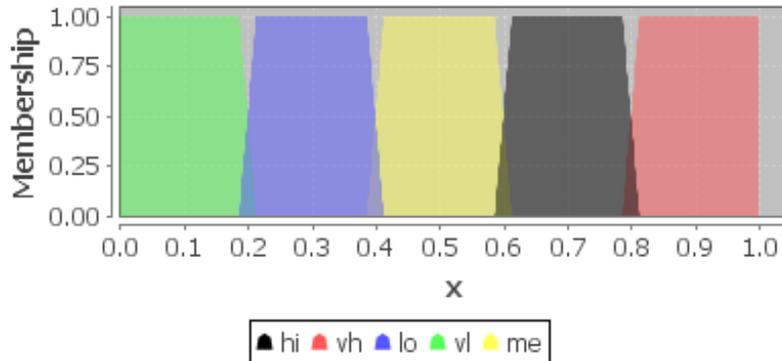


Figura 2 Fusificación de la variable lingüística de entrada s1.

- Defusificación de las Variables Lingüísticas de Salida:* Para la defusificación se necesitaron 15 variables de salida para manejar las mismas posibles congestiones de tráfico vehicular en un cruce, 4 para una sola calle, 6 para dos calles, 4 para tres calles y 1 para cuatro calles (tCS1, tCS2, tCS3, tCS4, tCS12, tCS13, tCS14, tCS23, tCS24, tCS34, tCS123, tCS124, tCS134, tCS234, tCS1234), dando como ejemplo lo realizado para tCs1, según sigue a continuación, ver figura 3:

```

DEFUZZIFY tCS1
TERM vl := (0.0, 1) (0.1866, 1) (0.2133, 0);
TERM lo := (0.1866, 0) (0.2133, 1) (0.3866, 1) (0.4133, 0);
TERM me := (0.3866, 0) (0.4133, 1) (0.5866, 1) (0.6133, 0);
TERM hi := (0.5866, 0) (0.6133, 1) (0.7866, 1) (0.8133, 0);
TERM vh := (0.7866, 0) (0.8133, 1) (1, 1);
METHOD : COG;
DEFAULT := 0.0;
RANGE := (0.0 .. 1);
END_DEFUZZIFY
    
```

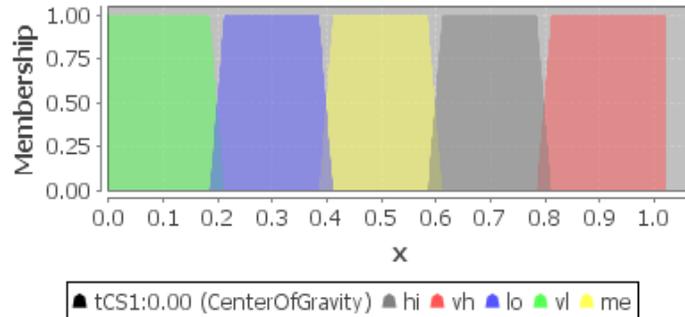


Figura 3 Defusificación de la variable lingüística de salida tCS1.

Es importante mencionar que para la defusificación se usó el centro de gravedad (COG), lo cual implica que el valor a obtener para la congestión vehicular presente se ubica en el centro del rango de pertenencia del conjunto difuso correspondiente.

- *Reglas de Inferencia Difusas:* En un total de 61 reglas difusas se consideraron los 5 probables valores lingüísticos (muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto) para las 15 variables de salida, quedando como ejemplos las siguientes, figura 4:

RULE 1: IF (s1 IS vh AND s2 IS NOT vh AND s3 IS NOT vh AND s4 IS NOT vh) THEN tCS1 IS vh;

RULE 17: IF (s1 IS vh AND s2 IS vh AND s3 IS NOT vh AND s4 IS NOT vh) THEN tCS12 IS vh;

RULE 41: IF (s1 IS vh AND s2 IS vh AND s3 IS vh AND s4 IS NOT vh) THEN tCS123 IS vh;

RULE 57: IF (s1 IS vh AND s2 IS vh AND s3 IS vh AND s4 IS vh) THEN tCS1234 IS vh;

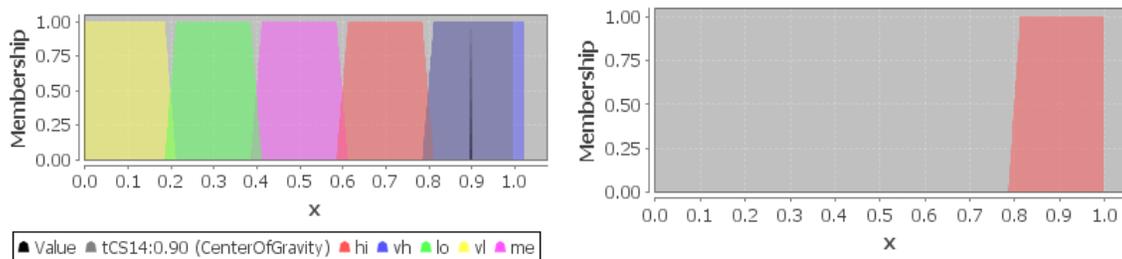


Figura 4 Aplicación de las reglas de inferencia difusa para obtener una tasa de congestión vehicular muy alta.

Segunda Etapa: Diseño y Construcción de la Red Vial

Para llevar a cabo esta etapa, se realizaron los siguientes 2 pasos:

- *Modelado del Escenario de la Red Vial en AnyLogic:* En este paso, se modeló bajo la plataforma AnyLogic [Borshchev, 2004], [Grigoryev, 2012], [Grigoryev, 2015] una red vial de 7 calles con 2 crucesos respetando una topología de Manhattan [Chung, 1993], [Brassil, 1994], en la cual no se incluyeron zonas habitacionales o edificios, ni se consideraron aspectos referentes a los peatones. Cada calle es de 3 carriles en cada sentido de dirección de flujo vehicular. A los crucesos convergen y divergen cuatro calles, respectivamente. En la figura 5, se presenta el escenario que fue generado, en el cual se aprecia que a pesar de ser un escenario pequeño no deja de ser complejo y resulta apto para los fines de este trabajo.

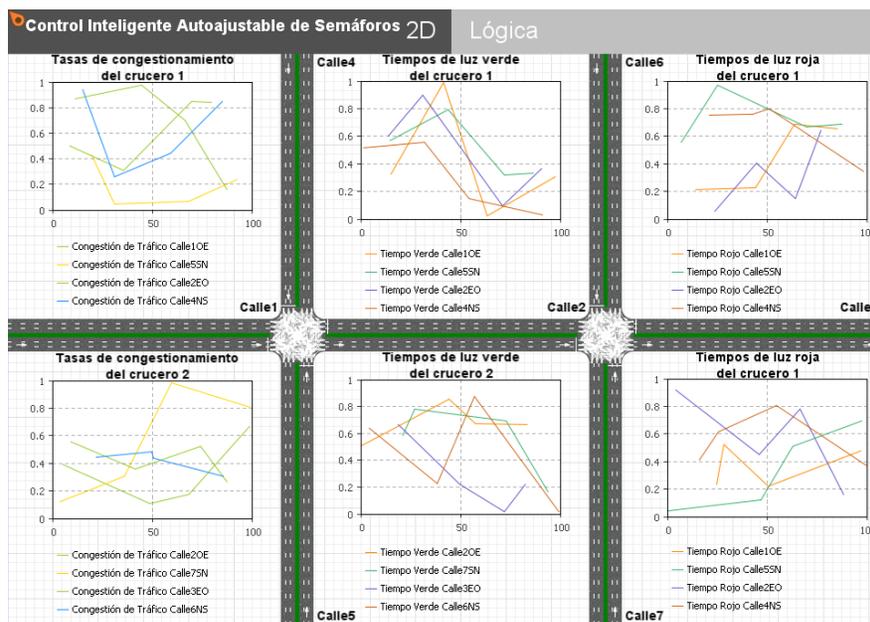


Figura 5 Modelado de la red vial en AnyLogic University.

- *Comportamiento de los Agentes y Lógica del Escenario de la Red Vial en AnyLogic:* Los automóviles y las calles fueron tratados como agentes, cuyo comportamiento fue programado dentro de la plataforma en el lenguaje Java. Por una parte, los autos agentes pueden en los crucesos, avanzar en cuatro direcciones: dar vueltas en “U” para retroceder por la misma calle en

el sentido opuesto, seguir avanzando en la misma dirección, dar vuelta a la izquierda o a la derecha, es decir, no están limitados por ninguna señal de tránsito, lo que obliga a que cada cruceo tenga sus 4 semáforos y existan 4 tiempos para la circulación de cada carril.

Por otra parte, las calles agentes contabilizan el número de automóviles que entra y sale de ellas para mantener actualizadas sus tasas de congestión vehicular. Claramente esta configuración evidencia más descontrol en una vialidad y es más propensa a que haya congestiones, de ahí que se escogió por su complejidad y semejanza con la realidad para ofrecer confiabilidad de los resultados arrojados en la simulación y con ello defender el modelo difuso como una buena solución.

La figura 6 presenta el diseño del comportamiento de los agentes auto y calle, además de la lógica de ejecución de la red vial en AnyLogic. Se puede observar que hay 6 sentidos de entrada, es decir, aquellos correspondientes a las calles que la alimentan o saturan, así como los 6 sentidos de salida (opuestos a los de entrada), ósea los que la liberan o desahogan. Para cada cruceo se programó además un conjunto de 4 agentes semáforo que se encargan de ajustar y balancear los tiempos de las luces verde y roja de cada semáforo, acorde a lo que diga el sistema de control difuso tras cada ciclo de cruceo (ejecución de los tiempos de las 3 luces de los 4 semáforos).

Se programaron además eventos de tiempo que hacen que tras cada ciclo de cada cruceo se puedan evaluar las 4 tasas de congestión vehicular correspondientes a las cuatro calles que convergen en ellos para que mediante el sistema de control difuso se pueda saber si es en 1, 2, 3 o 4 calles donde su luz verde debe ser aumentada y en las otras restantes su luz roja disminuida para que eventualmente se logre un balance de las tasas de congestión de tráfico vehicular.

Finalmente, se programó un evento de tiempo que modifica cada minuto las tasas de arribo (7 como mínimo a 24 como máximo vehículos) de los 6 sentidos de entrada de la red vial.

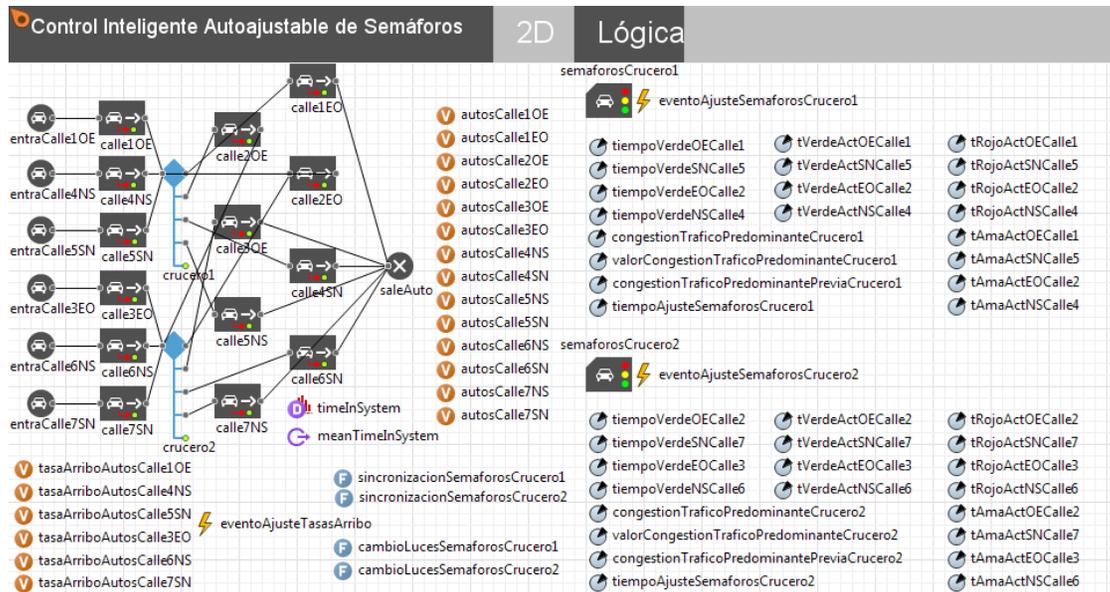


Figura 6 Especificación del comportamiento y lógica de la red vial.

3. Resultados

Posteriormente, ya con el escenario, semáforos y automóviles, se generó un caso de estudio donde los valores iniciales de tiempo para los 4 semáforos en cada cruce fueron como siguen (ver figura 7):

- Las luces en siga (verde) en 17 segundos.
- Las luces en preventiva (amarillas o ámbar) en 3 segundos.
- Las luces en alto (rojas) en 60 segundos (3 ciclos de espera de luces siga-preventiva por los otros 3 semáforos en el cruce).

Los tiempos de luz verde y roja de cada semáforo son actualizados al terminar cada ciclo de cruce, según lo que indique el sistema de control difuso. Estos pueden ir de 80 segundos como mínimo a 240 segundos como máximo. No es un objetivo el mostrar estadísticas de reducción o incremento de tiempo en las luces de los semáforos, sino el poder ver mediante la simulación que el ajuste y control de los tiempos mediante el modelo difuso conduce a tener un balance de las tasas de congestión vehicular y por ende de los tiempos en las luces de los semáforos. Sin embargo, las gráficas de evolución de los tiempos de dichas luces se pueden ver en la figura 7.

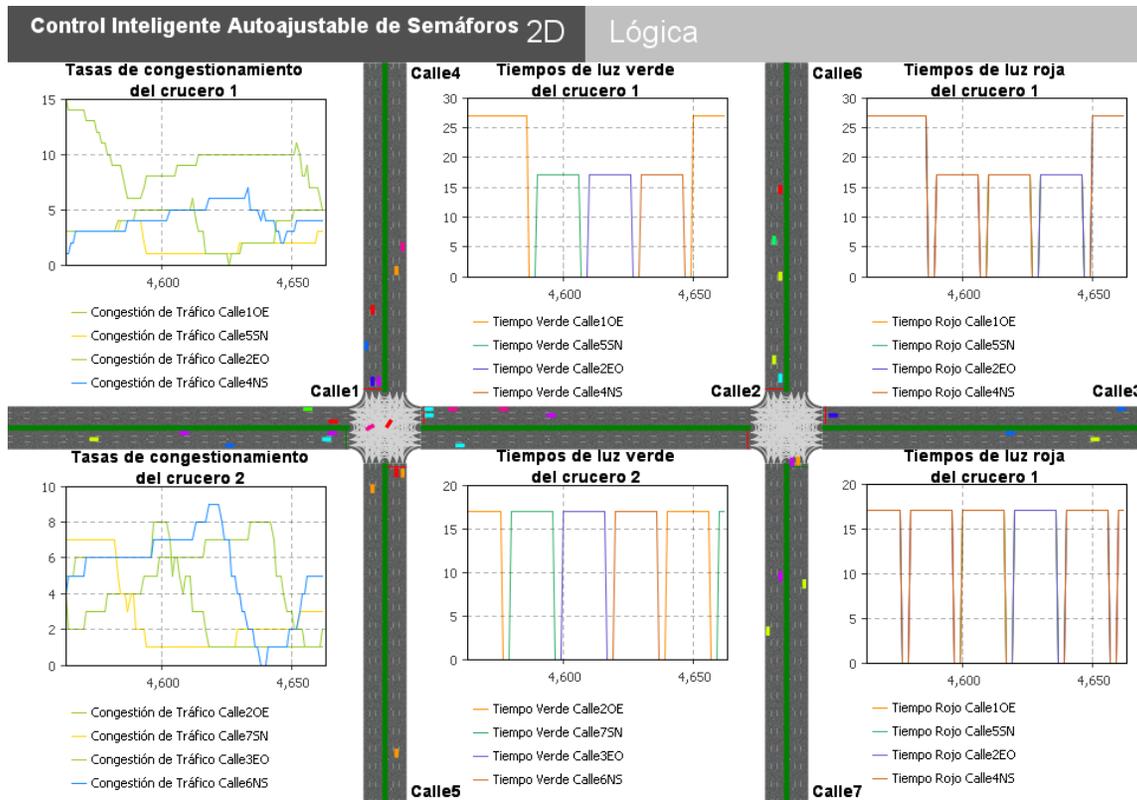


Figura 7 Ejecución del caso de estudio sobre la red vial.

Una vez que los automóviles toman un sentido de salida sobre las calles de la red vial estos son descartados y se descuentan de las respectivas tasas de congestionamiento vehicular, algo similar se hace con los que toman un sentido de entrada de sobre las calles, puesto que estos se conservan y se contabilizan en las respectivas tasas de congestionamiento vehicular, ver figura 8. Dado que las tasas de arribo son variables (de 7 a 24 vehículos por minuto), se tiene que no siempre la congestión vehicular es dinámica lo que permite que se aprecie mejor la funcionalidad del modelo difuso propuesto.

4. Discusión

En la figura 7, se ve en el caso de estudio presentado que la red vial tiende a tener un balance de tiempos de las luces de los semáforos y de las tasas de congestionamiento vehicular, evitando que colapse, es decir, reduciendo la saturación de tasas de congestionamiento vehicular muy altas, permitiendo un flujo más continuo de los automóviles sobre las calles de la red vial.

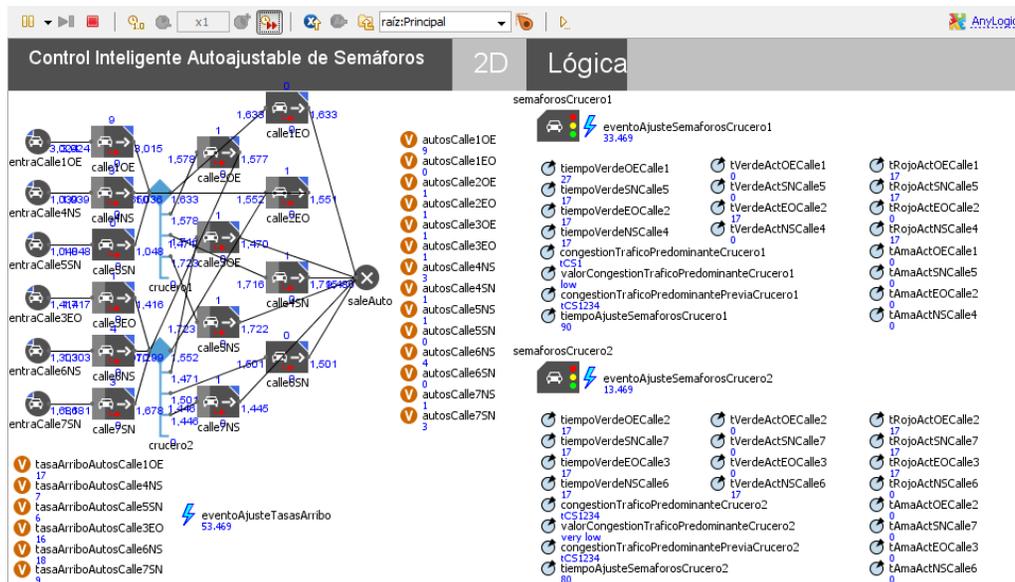


Figura 8 Lógica de la ejecución del caso de estudio sobre la red vial.

En la figura 8, de la lógica de ejecución de la red vial se aprecia que a pesar de que en algunas ocasiones las tasas de congestionamiento vehicular sean altas o muy altas, con el tiempo (eventualmente de 1 a 3 ciclos de cruceo) tienden a ser disminuidas para quedar en un rango de bajo o muy bajo, lo cual indica que el modelo de control difuso fue eficaz al dar un buen control y satisfactoria reducción del tráfico vehicular sobre la red vial, evitando que esta sea colapsada al buscar que se tenga un equilibrio de las tasas de congestionamiento vehicular y balance de los tiempos de las luces de los semáforos de los cruceos vehiculares.

Para poder dar las afirmaciones pasadas, se hicieron dos ejecuciones del caso de estudio, con tiempos de simulación de una semana y un mes, respectivamente, de ahí se logró deducir la pertinencia del sistema de control difuso.

Dado que a diferentes horas del día y en diferentes días de la semana existirán flujos diversos de automóviles, un modelo pasivo no es funcional, a menos que la población en el área sea mínima, lo que daría como resultado un flujo reducido de automóviles.

El uso de un modelo dinámico que se autoajuste o autorregule puede ser una alternativa muy atractiva para el reajuste de los tiempos en los diversos semáforos en un cruceo, un área metropolitana más amplia o inclusive una ciudad, previa validación y simulaciones partiendo de entornos basados en datos reales.

Los sistemas de semáforos inteligentes son ampliamente investigados para mejorar las vialidades de muchas ciudades. Estos sistemas pueden tomar variables como la velocidad de los autos, el tamaño de ellos, el flujo de automóviles, la forma de las avenidas (cruceos o glorietas). Así como se pueden tener algoritmos matemáticos para ajustar los tiempos de los semáforos, o bien algoritmos de inteligencia artificial. Un ejemplo podría ser un sistema de conteo de automóviles el cual procese las imágenes para detectar cuantos autos están entrando a una avenida, por otro lado, podrían existir otros tipos de sensores que eviten hacer el procesamiento de las imágenes. En cualquiera de las dos formas, se tiene el número de autos que pasan por un punto determinado.

5. Conclusiones

El control dinámico de semáforos abre una línea de trabajo muy importante en la búsqueda de algoritmos e implementación de soluciones que permitan un control activo de los tiempos de sus luces, considerando para este fin diversas variables para el reajuste de tales tiempos, es aquí donde la lógica difusa tiene cabida dado que permite evaluar la incertidumbre de las tasas de congestión vehicular en las calles para saber qué semáforos necesitan ser activados en luz verde y cuáles desactivados en luz roja, usando la luz amarilla como fase preventiva para el desahogo de los cruceos y el evite de colisiones en los mismos.

La topología Manhattan se empleó debido a que es un estándar en el modelado de redes de calles en entornos urbanos y ofrece la ventaja poder crear un grafo de conexiones entre calles de entrada y salida de una red vial, así como de las que convergen y divergen en cruceos vehiculares. El incremento de tiempo en luz verde y decremento de tiempo en luz roja para los semáforos de los cruceos se fue dando con el tiempo, pero siempre tendiendo a lograr un equilibrio de tiempos entre dichos semáforos al reducir y balancear las tasas de congestión vehicular sobre las calles que alimentan a tales cruceos.

Poniendo de lado la mala organización y planeación de las grandes urbes como la ciudad de México, así como la zona metropolitana del Estado de México, es

necesario, tener un mejor entendimiento del tráfico vehicular para poder hacer mejoras, en un inicio, a los semáforos que actualmente operan en ella.

Un sistema inteligente de semáforos usando lógica difusa el cual permita autorregular los tiempos de los semáforos, será benéfico para los habitantes de dichas zonas geográficas dado que podrán trasladarse más rápidamente, evitando un gasto mayor de gasolina, contaminando menos, posiblemente con menos estrés del volante, y hasta se podría pensar en una mejor calidad de vida al permitirles tener más tiempo para las actividades que realizan día a día.

El éxito de este proyecto permitirá no sólo poder entender y hacer propuestas en las vialidades en cuanto a los semáforos, sino tener una plataforma que pueda modelar el comportamiento de una zona geográfica de la ciudad, y poder así, hacer propuestas para reestructurar y planear de una mejor forma las vialidades de ésta.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aguirre Quezada, J. P., Movilidad urbana en México, Dirección General de Análisis Legislativo, Instituto Belisario Domínguez, 2017.
- [2] Alkandari, A. A., & Alshammari, A. M., Theory of dynamic hybrid fuzzy logic control of traffic light network with accident detection and action system. Second International Conference on Computing Technology and Information Management (ICCTIM), 2016.
- [3] Borshchev, A., & Filippov, A., AnyLogic-multi-paradigm simulation for business, engineering and research. 6th IIE annual simulation solutions conference, 2004.
- [4] Brassil, J., Choudhury, A. K., & Maxemchuk, N. F., The Manhattan Street Network: a high performance, highly reliable metropolitan area network. *Computer Networks and ISDN Systems*, 26(6-8), 841-858, 1994.
- [5] El Hatri, C. & Boumhidi, J., Q-learning based intelligent multi-objective particle swarm optimization of light control for traffic urban congestion management. 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), 2016.

- [6] Chen, G., & Pham, T. T., Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. CRC press, 2000.
- [7] Chung, T. Y., & Agrawal, D. P., Design and analysis of multidimensional Manhattan Street Networks. *IEEE transactions on communications*, 41(2), 295-298, 1993.
- [8] Cingolani, P., & Alcalá-Fdez, J., jFuzzyLogic: a robust and flexible Fuzzy-Logic inference system language implementation. In *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2012 IEEE International Conference on (pp. 1-8). IEEE, June 2012.
- [9] Fleck, J. L., Cassandras, C. G., & Geng, Y., Adaptive quasi-dynamic traffic light control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016.
- [10] Ghazal, B., ElKhatib, K., Chahine, K., & Kherfan, M., Smart traffic light control system. *Third International Conference on Electrical, Electronics, Computer Engineering and their Applications (EECEA)*, 2016.
- [11] Grigoryev, I., AnyLogic 6 in three days: a quick course in simulation modeling. AnyLogic North America, 2012.
- [12] Kumar, M. A., Kumar, G. A., & Shyni, S. M., Advanced traffic light control system using barrier gate and GSM. *International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)*, 2016.
- [13] Grigoryev, I., AnyLogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling, 2015.
- [14] International Electrotechnical Commission: [http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:91:0:::FSP_LANG_ID:25?q=Fuzzy Control Language](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:91:0:::FSP_LANG_ID:25?q=Fuzzy%20Control%20Language), 2014.
- [15] Khasnabish, B., Topological properties of Manhattan street networks. *Electronics Letters*, 25(20), 1388-1389, 1989.
- [16] Kuzminvkh, I., Development of traffic light control algorithm in smart municipal network. *13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, 2016.
- [17] Li, J., Zhang, Y., & Chen, Y., A Self-Adaptive Traffic Light Control System Based on Speed of Vehicles. *IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*, August 2016.

- [18] Moghaddam, M. J., Hosseini, M., & Safabakhsh, R., Traffic light control based on fuzzy Q-learning. International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP), 2015.
- [19] Qi, L., Zhou, M., & Luan, W., A Two-level Traffic Light Control Strategy for Preventing Incident-Based Urban Traffic Congestion. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016.
- [20] Rashid, H. Ashrafi, M.J.F. Azizi, M. & Heydarinezhad, M.R., Intelligent traffic light control based on clustering using Vehicular Ad-hoc Networks. 7th Conference on Information and Knowledge Technology, 2016.
- [21] Rosyadi, A. R., Wirayuda, T. A. B., & Al-Faraby, S., Intelligent traffic light control using collaborative Q-Learning algorithms. 4th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT), 2016.
- [22] Sivakumar, R., Vignesh, G., Narayanan, V., Prakash, S., & Sivakumar, V., Automated traffic light control system and stolen vehicle detection. International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), May 2016.
- [23] Zadeh, L. A., Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. Communications of the ACM, 37(3), 77-85, 1994.
- [24] Younis, O., & Moayeri, N., Cyber-physical systems: A framework for dynamic traffic light control at road intersections. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2016.