

# SIMULACIÓN DE RED DE SEMÁFOROS INTELIGENTES BASADOS EN LÓGICA DIFUSA, CASO DE ESTUDIO: LA PAZ - BOLIVIA

Torrigo Barahona Fabricio Gabriel  
Carrera de Ingeniería de Sistemas  
Escuela Militar de Ingeniería  
La Paz, Bolivia  
ftorricob@est.emi.edu.bo

## SIMULATION OF INTELLIGENT NETWORK TRAFFIC LIGHTS BASED ON FUZZY LOGIC, CASE STUDY: LA PAZ - BOLIVIA

**Resumen** —El presente artículo propone el diseño de una red de semáforos de control centralizado, que emplea un sistema experto basado en lógica difusa para contribuir a la reducción del congestionamiento vehicular, el caso de estudio se realizó en la intersección de una avenida en la ciudad de La Paz - Bolivia. La red de semáforos inteligentes pretende obtener la afluencia vehicular a través de tecnología de identificación por radio frecuencia RFID, aplicando lógica difusa para la toma de decisiones y configuración de los tiempos de indicación de señal (rojo, ámbar, verde) de los semáforos de una intersección. En este trabajo se validó el sistema experto realizando una simulación de la intersección existente con la misma afluencia vehicular para cada configuración de los semáforos. Se evidenció que la red diseñada reduce el congestionamiento vehicular comparado con el sistema actual.

**Palabras claves** — Control de semáforos, Sistemas difusos, Sistemas expertos, Identificación por radiofrecuencia, congestión vehicular.

**Abstract** -The present article proposes the design of a network of centralized control traffic lights, which

uses an expert system based on fuzzy logic to contribute to the reduction of traffic congestion, the case study was conducted at the intersection of an avenue in the city of La Paz - Bolivia. The network of intelligent traffic lights aims to obtain vehicular traffic through RFID radio frequency identification technology, applying fuzzy logic for making decisions and configuring the signal indication times (red, amber, green) of the traffic lights of a intersection. In this work, the expert system was validated by performing a simulation of the existing intersection with the same vehicular traffic for each configuration of the traffic lights. It was evidenced that the designed network reduces vehicular congestion compared to the current system.

**Key words** - Control of traffic lights, diffuse systems, expert systems, radiofrequency identification, vehicular congestion.

### I. INTRODUCCIÓN

La congestión de tráfico vehicular ha estado causando muchos problemas críticos y desafíos en la mayoría de las ciudades de los países modernos. Para un turista, la congestión significa tiempo

perdido, oportunidades perdidas y frustración. Para un empleador, congestión significa pérdida de productividad del trabajador, oportunidades comerciales, retrasos en la entrega y mayores costos [1].

Hoy en día es muy empleado el término “Ciudades Inteligentes”, haciendo referencia a un desarrollo urbano basado en la sostenibilidad, que es capaz de responder adecuadamente a las necesidades básicas de instituciones, empresas y de los propios habitantes, tanto en el plano económico, como en los aspectos operativos, sociales y ambientales.

La ciudad de La Paz ha experimentado una evolución en la semaforización que presentan sus intersecciones. El primer semáforo era operado por un oficial de policía, quien alternaba la indicación de señal del mismo manualmente. Posteriormente, con el desarrollo de la tecnología, se añadió la luz amarilla y funcionaban de manera autónoma con ciclos pre programados. Actualmente los semáforos administrados por el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz utilizan secuencias simples pre-programadas, con personal especializado y experimentado que realiza la configuración de los mismos. Si bien existe la infraestructura y tecnología necesaria, los criterios para configurar los ciclos de los semáforos no obedecen a parámetros establecidos y es el criterio y experiencia de la persona que configura lo que prima para tratar de optimizar la asignación de prioridad de circulación en intersecciones, generando de tal modo congestión vehicular en las principales arterias de la ciudad de La Paz, especialmente en horas pico.

Para la realización del presente trabajo se analizaron las características de diferentes intersecciones; se diseñó y realizó el plano de red que identifica antenas y lectores RFID, semáforos, controladores de los semáforos y cableado (coaxial y fibra óptica) para la avenida donde se implementará la solución; se desarrolló el sistema experto y la lógica que aplica para la toma de decisiones; se codificó y desarrolló software que permite gestionar los semáforos aplicando el método desarrollado; finalmente se realizaron las pruebas y se demostró que la solución planteada resuelve el problema identificado. En el presente artículo se pondrá especial énfasis en la explicación del desarrollo del sistema experto y la lógica difusa que aplica el mismo.

## II. ESTADO DEL ARTE

Los autores Kaur y Konga describieron en [2] el diseño de un controlador de semáforo difuso, que cambia el tiempo de indicación de señal considerando a dos parámetros, la densidad de vehículos que están tras el semáforo y el ciclo actual. El modelo ha sido desarrollado y probado para predecir el comportamiento del sistema bajo las condiciones del tráfico. Khalid et al. propusieron en [3] un controlador de semáforo difuso para ser utilizado en un cruce vehicular complejo. El controlador es capaz de comunicarse con intersecciones vecinas y gestionar secuencias de fase y longitudes de fase de forma adaptativa. Choi et al. emplean en [4] controladores de lógica difusa adaptados para hacer frente al flujo de tráfico congestionado. Las comparaciones con los controladores de semáforos fijos de lógica difusa, indicaron que esta mejora puede conducir a un mayor flujo vehicular en condiciones de tráfico muy concurrido. Gi Young et al. generaron en [5] un flujo vehicular óptimo usando un controlador difuso. El cambio de luz en los semáforos propuesto, tienen una mejor eficiencia que los ciclos preestablecidos de la señal de tráfico, porque son capaces de extender o acortar el ciclo de señal cuando aumenta el número de vehículos. Utilizaron valores difusos de función de membresía entre 0 y 1 que estiman la longitud incierta de un vehículo, velocidad del vehículo y ancho de una carretera. En el trabajo de Ashwin et al. en [6], se realiza un cálculo efectivo de la densidad del tráfico en función de imágenes recogidas por cámaras ubicadas en las columnas de tráfico. El método consiste en un procesamiento de imágenes con eliminación y detección de píxeles, seguido de un controlador difuso. Tras inferir la densidad del tráfico, este es evaluado por un controlador difuso para determinar la temporización de las señales de tráfico. Una vez analizadas las características que presenta el sistema estudiado y considerando que el mismo es configurado por un experto humano, se decidió trabajar con sistemas difusos, aprovechando la versatilidad y semejanza que los mismos presentan con el razonamiento humano.

### III. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

#### A. *Sistemas Expertos*

Los sistemas expertos basados en el conocimiento, son programas informáticos fundamentados en técnicas de Inteligencia Artificial y diseñados para alcanzar el nivel de desempeño de un experto humano, en un dominio limitado de resolución de problemas [7].

Existe un gran número de aplicaciones de Sistemas Expertos en la ingeniería de sistemas de transporte [8]. Estos programas ofrecen ventajas significativas en dominios de problemas donde los algoritmos explícitos no existen, o donde los programas de computadora tradicionales proporcionan resolución de problemas con capacidades restringidas.

#### B. *Lógica difusa*

La lógica difusa ofrece una representación formal de términos como "más", "menos", "más largo", etc. Por tanto, las reglas como "si hay más tráfico de norte a sur, las luces deben permanecer verdes por más tiempo" pueden ser razonadas de esa manera [9]. El controlador de lógica difusa determina el tiempo que el semáforo debe permanecer en cierto estado antes de pasar al siguiente. El orden de los estados está predeterminado, pero el controlador puede omitir un estado si no hay tráfico en una dirección determinada [10].

En la actualidad el sistema de lógica difusa lo encontramos hasta en nuestros hogares, mejorando la comodidad para desarrollar labores básicas y simples, como ejemplo se puede nombrar sistemas de foco automático en cámaras fotográficas, lavadoras automáticas, aire acondicionado, hornos microondas. También en las industrias, por ejemplo en operación de plantas de cemento, control de hornos de vidrio, control de reactores nucleares. El utilizar una tecnología como la lógica difusa en un sistema de semáforos en La Paz - Bolivia, permitirá que nuestra sociedad pueda aceptar el uso de Sistemas Inteligentes permitiendo mayor confort y comodidad a las personas.

#### C. *Ingeniería de Tráfico*

La ingeniería de tráfico es una rama de la ingeniería civil, que ahonda en temas específicos de transporte como ser diseño de vías, elementos del tránsito, sus características (velocidad, densidad, flujo, volúmenes de tránsito), modelos para el análisis del flujo vehicular, capacidad y niveles de servicio, señalización, estacionamientos y accidentalidad entre otros. Muchos de estos elementos fueron empleados para la realización del trabajo; sin embargo, es necesario tener claro dos conceptos para poder entender el presente artículo. El primero de ellos es "movimientos", que hace referencia a aquella maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila en una intersección. El segundo concepto importante es "fase", el cual se define como parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos; una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales [11]. Para un mejor entendimiento, Figura 1 y Figura 2 muestran lo detallado previamente para una intersección en particular.

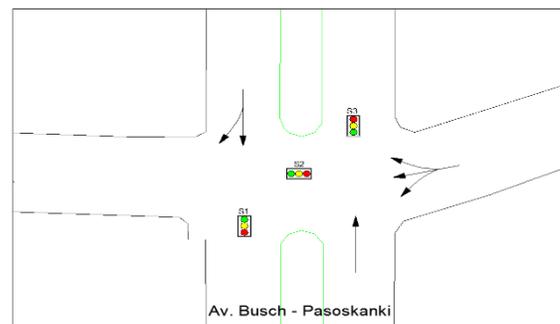


Figura 1. Movimientos en una Intersección

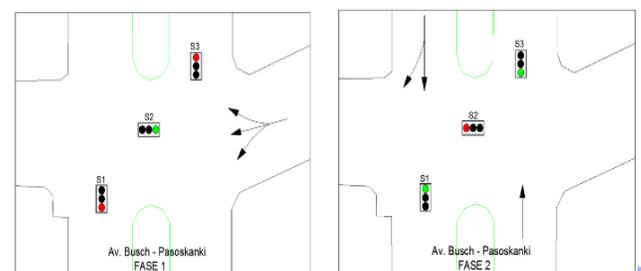


Figura 2. Fases de una Intersección

#### IV. METODOLOGIA PROPUESTA

En la presente sección se expone el método propuesto y las actividades realizadas con el fin de reducir la congestión de tráfico vehicular.

##### A. Descripción del Proceso

La Figura 3 muestra el proceso actual de la configuración de los ciclos de los semáforos.

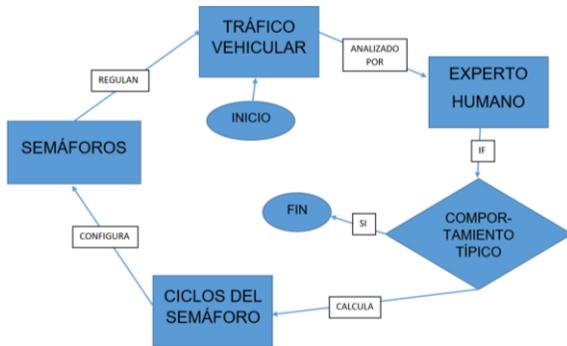


Figura 3. Proceso de Configuración de Semáforos Actual

Figura 4 muestra la propuesta realizada en este trabajo, la misma desarrolla un sistema experto que configura los ciclos de los semáforos, considerando los mismos parámetros que toma el experto humano (la afluencia vehicular) pero contando con mayor cantidad de datos actualizados, gracias a los sensores que emplea y aplicando lógica difusa, lo que mejora los resultados obtenidos comparándolos con aquellos que se generan cuando es el experto humano quien configura los ciclos.

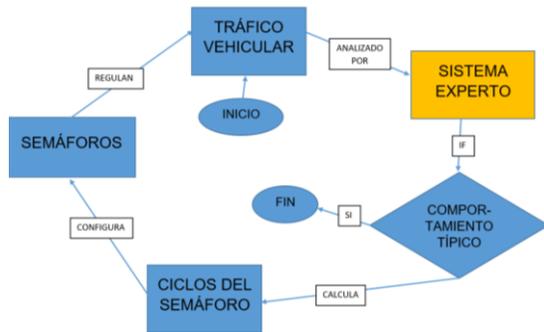


Figura 4. Proceso de Configuración de Semáforos Propuesto

##### B. Sistema Experto Propuesto

El sistema experto propuesto, tiene como entradas la cantidad de vehículos en cada calle de

una intersección, las funciones que realiza son la obtención de la cantidad de vehículos, el cálculo de tiempos para los ciclos de los semáforos y el establecimiento de los mismos; como salida genera la configuración de los ciclos de los semáforos. Las entradas, procesos y salidas mencionadas son diagramados en la Figura 5.



Figura 5. Entradas, procesos y salidas del Sistema Experto

##### C. Control Difuso

Se emplea un control difuso aplicando el método de inferencia de tipo Mamdani.

El sistema experto empleará dos tipos de arquitecturas para la aplicación de lógica difusa, la primera con dos variables de entrada / dos variables de salida y una segunda con tres variables de entrada / tres variables de salida. Se desarrollan estas dos arquitecturas debido a que, tras la realización del análisis, sin importar la cantidad de semáforos que existan en una intersección, ésta presentará dos o tres fases, correspondiendo las mismas a las variables de entrada como de salida.

1) *Variables y Etiquetas Lingüísticas:* Las variables lingüísticas de entrada hacen referencia a la cantidad de vehículos para una fase dada en un tiempo determinado y reciben el nombre de “vehículosFase1”, “vehículosFase2” y “vehículosFase3”. El universo del discurso está en el rango de [0 50] y las etiquetas lingüísticas de estas variables son:

- Poco (P)
- Regular (R)
- Mucho (M)

Por otra parte, las variables lingüísticas de salida hacen referencia a los tiempos que se asignará a los semáforos de cada fase y reciben el nombre de “tiempoFase1”, “tiempoFase2” y “tiempoFase3”. El universo del discurso oscila en

el rango [13 60], esto debido a que al tiempo asignado se restará 3 segundos para el estado de cambio de fase de color ámbar y según características descritas, un estado que asigna prioridad de circulación debe estar configurado con al menos 10 segundos y tiene un máximo permitido de 60 segundos por fase. Las etiquetas lingüísticas de las variables descritas son:

- Poco Tiempo (PT)
- Regular Tiempo (RT)
- Mucho Tiempo (MT)

2) *Funciones de Pertenencia:* Para las variables lingüísticas de entrada se tienen tres tipos de funciones de pertenencia, dos trapezoidales y una triangular como muestra la Figura 6.

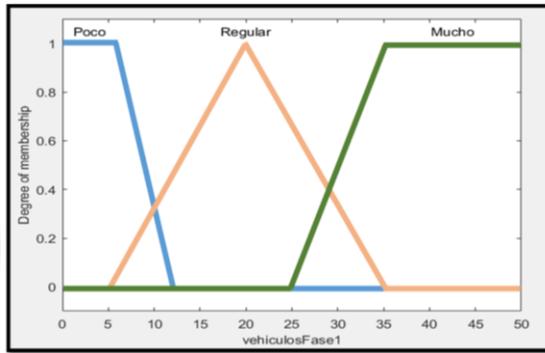


Figura 6. Funciones de pertenencia de las variables de entrada

Por su parte, para las variables lingüísticas de salida se tienen tres tipos de funciones de pertenencia, dos trapezoidales y una triangular como muestra la Figura 7.

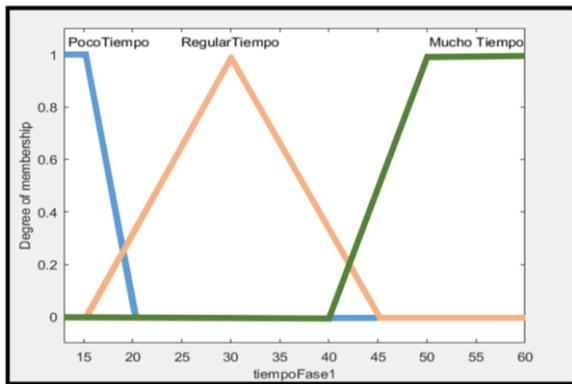


Figura 7. Funciones de pertenencia de las variables de salida

3) *Base de Reglas:* Las reglas para la arquitectura con dos variables, se muestran mediante el mapa de reglas en la Figura 8 y para tres variables en la Tabla 1.

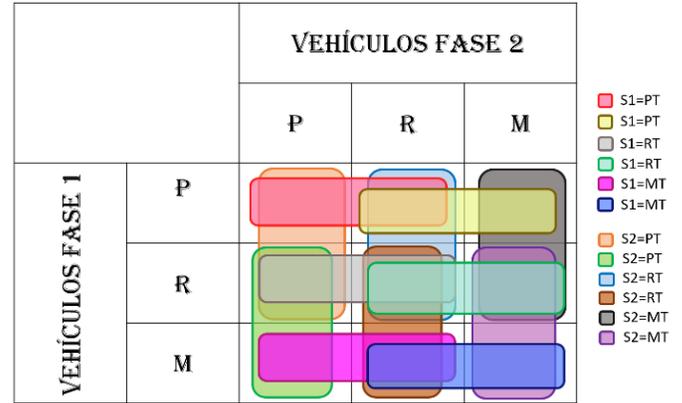


Figura 8. Mapa de Reglas para dos Variables

Regl a	SI vehícu los Fase1 es	Y vehícu s Fase2 es	Y vehícu los Fase3 es	Entonce s tiempo Fase1 es	Y tiempo Fase2 es	Y tiempo Fase3 es
1	P	P	P	PT	PT	PT
2	P	P	R	PT	PT	RT
...	...	...	...	...	...	...
26	M	M	R	MT	MT	RT
27	M	M	M	MT	MT	MT

Tabla 1. Reglas para tres Variables

Cabe aclarar además que el método de agregación de reglas a emplear es el operador máximo.

4) *Método de Defuzzificación:* Se analizaron los siguientes métodos de defuzzificación para seleccionar el que menor congestamiento vehicular genere:

- Centroide
- Bisector de Área
- MOM (Middle of Maximum)
- LOM (Largest of Maximum)
- SOM (Smallest of Maximum)

El análisis consistió en simular intersecciones que presentan tanto dos como tres fases y configurar los semáforos con los resultados obtenidos con cada uno de los métodos previamente citados, ver Figura 9 y Figura 10.



Figura 9. Simulación de una Intersección

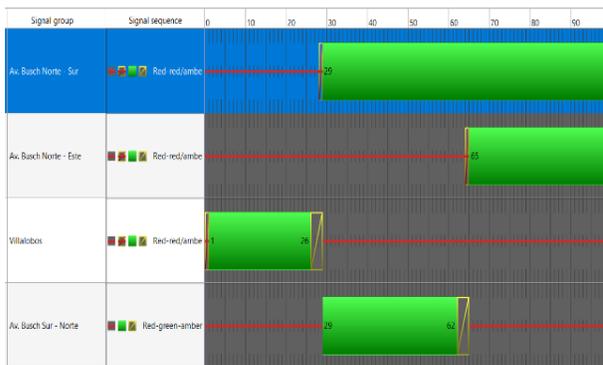


Figura 10. Configuración de Tiempos de Semáforos Simulados

La simulación se la realizó en el software Vissim v9, usando las duraciones defuzzificadas para hacer las simulaciones deterministas de acuerdo con los escenarios planteados. Los parámetros analizados son:

- El tiempo de llegada de los vehículos es el mismo para todas las simulaciones.
- El tiempo de servicio es el mismo para cada simulación.
- Se tomará un modelo de teoría de colas D/D/2, donde D una distribución determinista; es decir tiempos constantes y

se considerarán dos servidores debido a que cada calle o avenida cuenta con dos carriles.

- El tiempo de simulación en todos los escenarios es el mismo.

Método	Movimiento	Fase	Número de Vehículos	Tiempo Verde Asignado	Longitud de Cola Promedio
Centroide	Calle 1	1	35	52 (51.7)	16.32
	Calle 2				14.05
	Calle 3	2	15	30	19.22
	Calle 4				19.53
Bisector de Área	Calle 1	1	35	52	16.32
	Calle 2				14.05
	Calle 3	2	15	30 (29.9)	19.22
	Calle 4				19.53
MOM	Calle 1	1	35	53 (53.4)	14.67
	Calle 2				16.21
	Calle 3	2	15	30 (29.9)	19.98
	Calle 4				21.54
LOM	Calle 1	1	35	60	22.43
	Calle 2				15.28
	Calle 3	2	15	35 (34.6)	20.56
	Calle 4				19.02
SOM	Calle 1	1	35	47 (46.8)	15.46
	Calle 2				9.91
	Calle 3	2	15	25 (25.2)	16.24
	Calle 4				16.19

Tabla 2. Comparación de Métodos de Defuzzificación para Intersecciones con dos Fases

Método	Movimiento	Fase	Número de Vehículos	Tiempo Verde Asignado	Longitud de Cola Promedio
Centroide	Calle 1	1	11	29 (29.1)	96.04
	Calle 2 (Norte - Este)	2	33	44	122.87
	Calle 2 (Norte - Sur)				122.87
	Calle 3	3	27	36 (35.6)	88.6
Bisector de Área	Calle 1	1	11	29 (29.4)	96.12
	Calle 2 (Norte - Este)	2	33	47 (46.8)	111.04
	Calle 2 (Norte - Sur)				111.04
	Calle 3	3	27	34 (34.1)	88.98
MOM	Calle 1	1	11	30 (30.2)	94.68
	Calle 2 (Norte - Este)	2	33	52	100.57
	Calle 2 (Norte - Sur)				100.57
	Calle 3	3	27	30 (30.2)	93.65
LOM	Calle 1	1	11	39 (38.8)	91.46
	Calle 2 (Norte - Este)	2	33	60	125.61
	Calle 2 (Norte - Sur)				125.61
	Calle 3	3	27	39 (38.8)	90.64
SOM	Calle 1	1	11	22 (21.5)	100.3
	Calle 2 (Norte - Este)	2	33	44	96.87
	Calle 2 (Norte - Sur)				96.87
	Calle 3	3	27	22 (21.5)	97.71

Tabla 3. Comparación de Métodos de Defuzzificación para Intersecciones con tres Fases

Los resultados obtenidos se muestran en Tabla 2 y Tabla 3, tras el análisis de los mismos se seleccionó el método SOM debido a que es el que menor longitud de cola promedio genera (resultados resaltados en las tablas); es decir, aquel método cuyos resultados configurados en los tiempos de los semáforos, provoca que los vehículos que esperan se les asigne prioridad de circulación sea menor.

## V. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Para el proceso de experimentación se empleó el software de simulación Vissim V9, que es un modelo de simulación microscópico basado en el comportamiento, desarrollado para modelar el tráfico urbano y las operaciones de tránsito público. Actualmente se lo considera un líder en el campo del software de micro-simulación [12].

### A. Simulación y Experimentación

El congestionamiento vehicular se medirá por la longitud de cola promedio que se genera en cada calle de una intersección, mientras los vehículos esperan que el semáforo les conceda prioridad de circulación. Para medir dicho parámetro se empleará la herramienta de simulación mencionada. Se simularán ambos entornos, un primer escenario con la configuración actual de los semáforos (sin considerar la afluencia vehicular) y uno segundo en el cual sí se tomará en cuenta la afluencia vehicular, aplicando el razonamiento del sistema experto; se tomarán 40 muestras de simulaciones independientes para cada escenario y se analizará los resultados obtenidos en cada calle de la intersección estudiada. La intersección simulada la componen cuatro calles, generando dos fases como se muestra en la Figura 11.

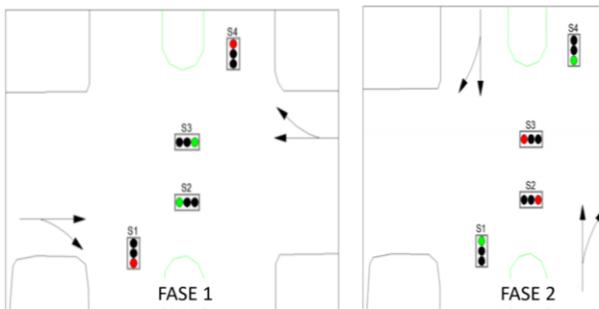


Figura 11. Fases de la intersección simulada

Para la simulación se tomará el escenario como un problema que se ajusta a teoría de colas, donde se tienen los siguientes supuestos a configurar en el entorno de simulación:

- Los tiempos de llegada  $\lambda$  (vehículos por minuto) son aleatorios.
- El tiempo de servicio  $\mu$  dependerá de factores como ser la aceleración de los vehículos y el tiempo de reacción del conductor, entre otros; factores que el simulador toma en cuenta de manera interna.
- Se considerará por tanto un modelo M/M/2, debido a que el tiempo de llegada y tiempo de servicio se ajustan a una distribución exponencial y existen dos carriles en cada calle, considerando los mismos como dos servidores que pueden atender de manera simultánea.
- Como medida de desempeño del sistema, se obtendrá de la simulación la longitud de cola promedio en cada calle, valor que será la muestra tomada de la población para su posterior tratamiento y análisis.

### B. Resultados

Tras haber realizado la simulación descrita, se grafica en un mismo plano (Número de muestra vs. Cantidad de vehículos en espera) la cantidad de vehículos en espera, acumulando los resultados de cada muestra; evidenciando así la diferencia entre los resultados obtenidos con la configuración actual de los semáforos, de aquellos que se generan con la configuración realizada por el sistema experto. (Ver Figura 12).

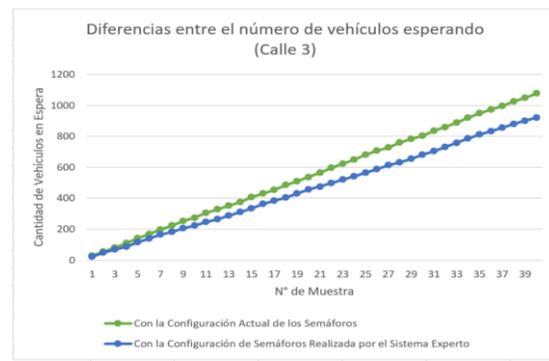


Figura 12. Diferencias entre número de vehículos esperando (Calle 3)

Analizando los resultados acumulados obtenidos en cada una de las 40 muestras, se evidencia que en la calle 1 se reduce la congestión en un 9.20 %, en la calle 2 en un 12.14%, 14.50% en la calle 3 y 7.92% en la calle 4.

Cabe aclarar que este gráfico muestra la reducción de vehículos en espera, por lo que siempre se mostrará la gráfica en forma de crecimiento lineal, por lo tanto, no llegará a tener la forma de un estado estacionario.

## VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

La investigación realizada tiene como objetivo contribuir a resolver un problema real y emergente en muchas ciudades del continente latinoamericano como es la tediosa congestión vehicular; demostrando que la aplicación de métodos de inteligencia artificial, más específicamente sistemas expertos basados en lógica difusa, puede resolver problemas reales y de índole social en Bolivia.

A su vez creemos que falta mucho por investigar, como ejemplo podemos citar: realizar comparaciones con otros modelos de teoría de colas, la determinación del tiempo de calentamiento del sistema, el tiempo de duración de la replicación y variación de fases para encontrar el factor crítico de todo el modelo. Todos estos puntos serán la base para nuestro próximo trabajo.

Una vez encontrado un modelo estable, también se deberá estudiar la variabilidad presente en el contexto de las calles bolivianas, que por distintos motivos (lejanías de la ciudad, factores socio-técnicos, históricos) varían mucho algunas calles de otras, por lo que se debe parametrizar la solución en calles que pueden ser “clave” para mejorar toda una ciudad.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Gobierno Autónomo Municipal de La Paz y la Agencia Nacional de Hidrocarburos por su contribución a la investigación del trabajo, mencionar también a la Escuela Militar de Ingeniería por albergar el mismo.

### REFERENCIAS

- [1] W. Wen, "A dynamic and automatic traffic light control expert system for solving the road congestion problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 34, pp. 2370 - 2381, 2008.
- [2] Kaur and Konga, "Fuzy traffic light controller," in *37th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1994.
- [3] M. Khalid, Liang See Chin, and R. Yusof, "Control of a complex traffic junction using fuzzy inference," in *Control Conference, Asia*, 2004.
- [4] W. Choi, H. Yoon, K. Kim, I. Chung, and S. Lee, "A traffic light controlling FLC considering the traffic congestion," in *Advances in Soft Computing, AFSS 2002, International Conference on Fuzzy Systems*, 2002, pp. 69-75.
- [5] Lim Gi Young, Jin Kang Jeong, and Hong You Sik, "The optimization of traffic signal light using artificial intelligence," in *10th IEEE International Conference in Fuzzy Systems*, 2001.
- [6] M. Ashwin, B. Arvind K., R. Barath Kumar, and S. Arun Karthik, "Pixel detection and elimination algorithm to control traffic congestion aided by Fuzzy logic," in *Fifth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*, Chennai, 2013, pp. 37-42.
- [7] C. Zozaya Goristiza and C. Hendrickson, "Expert systems for traffic signal setting assistance," *Journal of Transport Engineering*, vol. 2, p. 113, 1987.
- [8] C. Hendrickson, D. Rehak, and S. Fenves, "Expert Systems Applications in Transportation Systems Engineering," *Technical Report*, Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, 1985.
- [9] K. Tan K., M. Khalid, and R. Yusof, "Intelligent traffic lights control by fuzzy logic," *Malaysian Journal of Computer Science*, Feb. 1995.
- [10] M. Wiering, "Multi-Agent Reinforcement Learning for Traffic Light Control," in *Seventeenth International Conference (ICML'2000)*, 2000, pp. 1151-1158.
- [11] Rafael Cal, Mayor Reyes Spíndola, and James Cárdenas Grisales, *Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones*, Octava ed. México D.F.: Alfaomega, 2007.
- [12] Doina Koh S.Y and H.C Chin, "Traffic Simulation Modeling: VISSIM," *National University of Singapore, Faculty of Engineering Magazine*, p. 1, 2007.
- [13] Jennifer Agredo Fajardo, *Implementación de control de velocidad de un motor utilizando lógica difusa en la plataforma Labview*, 2011.

RECEPCION: 25/02//2019

APROBACION: 10/03/2019