

Control de Tráfico Vehicular usando un Sistema Neuro-difuso tipo ANFIS

Atiencia N. *, Ramírez V. *, Bravo Y. *

*Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Automatización y Control Industrial
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2507-144; e-mail: neymar.atiencia; yadira.bravo @epn.edu.ec; vic.ramireza@gmail.com

Resumen: La intención de este trabajo es proporcionar un enfoque en el manejo de la semaforización en la ciudad de Quito de acuerdo a los requerimientos de tránsito en una vía, basado en técnicas de control inteligente como lo es ANFIS. Se escoge un modelo de tráfico adecuado y se desarrolla un simulador, además se realiza la recolección de datos para alimentar al mismo y obtener los datos necesarios para entrenar la estructura ANFIS. Por último se valida el modelo en un software profesional dedicado para tráfico, AIMSUN

Palabras clave: Control, Semaforización, Mesoscopico, Neuro-difuso

Abstract: The intention of this paper is to provide a focus on managing the traffic lights in the city of Quito according to the requirements of traffic on a road, based on intelligent control techniques such as ANFIS. Choosing a suitable traffic model, a simulator is developed, and collected data feeds the same and then get the data needed to train the ANFIS structure. Finally the model is validated in a professional software dedicated to traffic, AIMSUN

Keywords: Control, Traffic Light, mesoscopic, Neuro-fuzzy

1. INTRODUCCIÓN

Con el pasar del tiempo en las grandes capitales del mundo, el flujo vehicular ha incrementado constantemente, sin embargo, el desarrollo de la infraestructura vial ha sido insuficiente; esto se ha reflejado en situaciones donde el volumen de tránsito en uno o más puntos de la red vial excede el volumen máximo de circulación. Por lo tanto, el control de tráfico inteligente es una herramienta muy importante para el alivio de la congestión vehicular y consecuentemente beneficia la calidad de vida de las personas, el medio ambiente y la economía de la ciudad.

En los últimos años el arquetipo de control del flujo vehicular mediante la programación de los semáforos ha presentado un sin número de variaciones que van desde la programación con tiempos fijos de las diferentes fases de los semáforos hasta la coordinación de grupos semafóricos desde una central computarizada, demostrando que se han obtenido grandes avances en el tema.

Ergo, existen diferentes propuestas de solución al problema de tráfico vehicular, pero a su vez existe un gran campo de trabajo, una muestra de ello es el modelo presentado en este artículo para optimizar el tiempo de sincronismo de los semáforos.

2. DISEÑO DEL CONTROLADOR DE TRÁFICO

Inicialmente se presenta un modelo de tráfico mesoscópico, el cual es el punto de partida para diseñar el control de los tiempos de desfase de verde entre los semáforos de cada intersección utilizando el ANFIS.

2.1 Descripción del Modelo

En “Modeling traffic through a sequence of traffic lights” [1] se introduce un modelo microscópico de tráfico vehicular; prácticamente es un modelo ideal basado en el comportamiento cinemático de un solo vehículo que viaja a través de una secuencia de semáforos que encienden y apagan con una frecuencia específica y que presentan distancias fijas (para este caso 100 m).

Partiendo de esta investigación, el primer objetivo es analizar una corriente vehicular (varios vehículos) a través de una secuencia de semáforos que puedan presentar distancias variables entre ellos y luego controlar estos semáforos para pretender mantener la velocidad máxima del flujo vehicular permitida en la vía. A continuación se describen los parámetros que componen la función:

La separación entre el n -ésimo y el $(n+1)$ -ésimo semáforo es L_n . La n -ésima luz es verde si $\sin(\omega n + \phi_n) > 0$ y roja en caso contrario, donde ωn es la frecuencia del semáforo y ϕ_n es el desfase entre semáforos, positivo si el verde del n -ésimo semáforo enciende luego de que haya encendido el verde del $(n-1)$ -ésimo semáforo y negativo en caso contrario. Un automóvil en esta secuencia de semáforos puede tener:

- Una aceleración positiva a_+ hasta que su velocidad alcanza la velocidad máxima de la vía $v_{m\acute{a}x}$.
- Una velocidad constante $v_{m\acute{a}x}$ con aceleración nula.
- Una aceleración negativa a_- hasta que se detiene.

$$\frac{dv}{dt} = \begin{cases} a_+\theta(v_{m\acute{a}x} - v), & \text{acelera} \\ a_-\theta(v) & \text{frena} \end{cases} \quad (1)$$

En la Ecuación (1), $\theta(v)$ es la función escalón unitario, la cual impide que el modelo arroje velocidades superiores a la máxima e inferiores a cero.

Como el auto se acerca al n -ésimo semáforo con velocidad v el conductor debe tomar una decisión, frenar o no en la distancia X_c :

$$X_c = \frac{V^2}{2a_-} \quad (2)$$

La diferencia entre L_n y X_c ($L_n - X_c$), es la distancia a la cual el vehículo puede acelerar hasta alcanzar la $v_{m\acute{a}x}$.

Para el modelo mesoscópico en el que se maneja un flujo vehicular, cada vehículo acelera con una aceleración a_+ , se supone que el primer vehículo en la fila posee una $a_+ = 1.39 \text{ m/s}^2$, este dato se obtiene de la velocidad máxima de circulación en el perímetro urbano y de medidas experimentales tomadas del tiempo promedio de aceleración de un vehículo.

$$a_+ = \frac{v_{m\acute{a}x}}{t_{\text{promedio_aceleraci3n}}} = \frac{50 \times \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}}}{10\text{s}} = 1.39 \text{ m/s}^2 \quad (3)$$

Se estima que cada vehículo que precede al primero disminuye su aceleración a_+ en un 2% [2], y se evalúa cada 0.1 segundos Δt la diferencia entre X y X_c (X es la distancia recorrida por el vehículo), cuando ésta sea menor a 1m se analiza el estado del semáforo, es decir, $\text{sen}(\omega_n t + \phi_n)$, si el resultado es positivo y $v < v_{m\acute{a}x}$ se continúa con a_+ , ó se mantiene v si $v = v_{m\acute{a}x}$; si el resultado es negativo se actualiza el valor de aceleración a a_- , que se calcula para que el n -ésimo vehículo frene dentro de la distancia correspondiente. Para limitar la aceleración mínima y máxima de frenado se hace referencia a datos medidos, de donde se obtienen las siguientes condiciones:

$$a_{-m\acute{i}n} = \frac{-v_{m\acute{a}x}}{t_{\text{m\acute{a}ximo_frenado}}} = \frac{-50 \times \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}}}{3.6\text{s}} = -3.9 \text{ m/s}^2 \quad (4)$$

$$a_{-m\acute{a}x} = \frac{-v_{m\acute{a}x}}{t_{\text{m\acute{i}nimo_frenado}}} = \frac{-50 \times \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}}}{3\text{s}} = -4.63 \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

En base a estos parámetros se calculan los datos de velocidad instantánea con los cuales se obtienen los datos de la velocidad promedio para los m autos del flujo vehicular.

La velocidad v de la ecuación del modelo inicial se reemplaza por el promedio de la velocidad promedio de los m vehículos (\bar{V}_t), es decir:

$$\bar{V}_t = \frac{\sum_{i=1}^m V_i}{m} \quad (6)$$

En la Ecuación (6) V_i es la velocidad promedio del m -ésimo vehículo.

Esta velocidad promedio se obtiene a partir de la velocidad instantánea del vehículo (V_{in}), la que se calcula cada 0.1 segundos (Δt), mientras el vehículo se desplaza en el flujo vehicular del n -ésimo hasta el $(n+1)$ -ésimo semáforo.

Donde:

$$V_{in} = V_o + a_+\Delta t \quad (7)$$

$$V_i = \frac{\sum_{i=1}^k V_{in}}{k} \quad (8)$$

En la Ecuación (7), V_o es la velocidad que lleva el vehículo en el intervalo de tiempo y en (8), k representa el número de intervalos (Δt) en los que se pueda dividir la sección. Luego de describir el modelo a utilizarse para caracterizar el flujo de vehículos a través de una vía, se utiliza (9) para sincronizar los tiempos de verde (t_v) y de desfase (t_d) de los semáforos:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{t_{v_n} + t_{a_n} + t_{r_n}} t + t_{d_n} \omega_n\right) > 0 \quad (9)$$

Donde:

t_{v_n} es el tiempo de verde del n -ésimo semáforo.

t_{a_n} es el tiempo de amarillo del n -ésimo semáforo.

t_{r_n} es el tiempo de rojo del n -ésimo semáforo.

t_{d_n} es el tiempo de desfase de la luz verde entre el n -ésimo semáforo y el $(n-1)$ -ésimo semáforo.

Se debe considerar que la longitud promedio de un vehículo es de 4 metros y la separación entre vehículos así como la reducción de la velocidad promedio de circulación por presencia de transporte público se encuentran a partir del modelo lineal planteado en "Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y aplicaciones" [3].

Partiendo de información recolectada mediante mediciones manuales en la zona en estudio, el volumen máximo vehicular (q_m) que se presenta sobre la avenida Colón es de alrededor de 2956 vehículos/hora, la velocidad máxima ($v_{m\acute{a}x}$) permitida en la vía es de 50 km/h (13,89 m/s) y debido a la presencia de transporte público en dos de los 4 carriles de la avenida en estudio esta se reduce en un 30%, se tiene entonces que la densidad de congestión vehicular (k_c) es:

$$k_c = \frac{4 * q_m}{v_{m\acute{a}x} * 0.7} = 337.8 \text{ veh/km} \quad (10)$$

El espaciamiento promedio a flujo máximo (s_m) es:

$$s_m = \frac{1}{k_m} = \frac{1}{\frac{k_c}{2}} = 6 \text{ m/veh} \quad (11)$$

Y la separación entre vehículos a flujo máximo (s_p) es:

$$s_p = s_m - l_v = 6 - 4 = 2 \text{ m/veh} \quad (12)$$

Adicionalmente se deben incluir las restricciones consideradas en este modelo, para el posterior desarrollo del simulador, las cuales consisten en:

- Tener un número máximo de 10 vehículos en un carril partiendo del reposo, esta restricción aparece debido a la geometría de la red vial (longitud entre intersecciones) que presenta la zona en estudio.
- Cada auto calcula si se encuentra en la zona en que puede frenar de forma normal para detenerse en la intersección y acomodarse uno a continuación de otro, manteniendo una separación (entre vehículos) igual a la inicial.
- Si el pelotón de vehículos se separa en más pelotones, cada vehículo debe redefinir la posición que ocupa dentro de su pelotón actual para mantener una separación adecuada entre vehículos al detenerse en una intersección.
- De acuerdo a la distancia de frenado y la velocidad que lleva el vehículo se calcula la aceleración de frenado, misma que no puede ser menor en modulo a $a_{-mín}$.
- Los autos se detendrán un metro después del semáforo de la última intersección en estudio.

2.2 Desarrollo de la Arquitectura ANFIS

Para el entrenamiento del modelo neuro-difuso, que se implementará, las reglas difusas del tipo Takagi-Sugeno se representan de la siguiente forma:

Regla n: Si X es A_n y Y es B_n , entonces $f_n = p_n X + q_n Y + r_n$, la arquitectura de las reglas implementadas es una combinación lineal entre los parámetros del antecedente de cada regla:

Regla n: Si X es A_n e Y es B_n , entonces $f_n = p_n X + q_n Y + r_n$,

Donde A_n y B_n son los conjuntos difusos de entrada y p_n , q_n , r_n son constantes, obteniendo un modelo Takagi-Sugeno de primer orden, para una salida lineal.

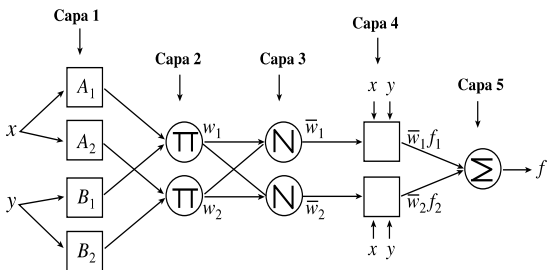


Figura 1. Arquitectura ANFIS equivalente [3].

Se deben generar los datos utilizados para construir la estructura de inferencia difusa (FIS), es decir una matriz de

datos entrada / salida que sea lo suficientemente representativa del comportamiento del modelo. Para construir la matriz mencionada se utilizó una matriz de 560x3 para los datos de entrada y una matriz de 560x1 para los datos de salida.

Para generar la estructura ANFIS se utilizaron los comandos de MATLAB que permiten escoger los parámetros adecuados para primero construir el Sistema de Inferencia Difuso FIS y luego entrenarlo.

Ahora la estructura ANFIS generada tendrá la información suficiente en sus 5 capas para poder ser evaluada ante un conjunto de datos representativos del sistema en estudio y así poder alcanzar la meta de lograr la velocidad máxima permitida en la avenida Colón.

Una vez que se obtenga la salida de velocidad deseada, los valores de tiempos de desfase serán guardados para luego realizar la simulación tanto en el Simulador implementado en MATLAB en base al modelo matemático descrito anteriormente como en el software profesional AIMSUN.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados del Modelo Desarrollado en MATLAB

Para validar el modelo matemático desarrollado se hicieron pruebas con varios vectores de tiempos de desfase, tal que se obtengan diferentes tipos de comportamiento del tráfico vehicular.

Primero se comprobará que usando los datos recolectados el simulador de tráfico desarrollado replique un comportamiento similar al real del tráfico vehicular presente en la zona en estudio.

El vector de tiempos de desfase cargado para esto, obtenido de mediciones manuales en la zona en estudio, es:

$$td=[0 \ -35 \ 33.2 \ -2.5 \ -1.8 \ 6.2 \ 2.8]$$

Se utilizó como punto de comparación la gráfica de la velocidad de los vehículos en función del tiempo, Fig. 2.

Mediante una prueba de campo de observación se probó que las interacciones de los vehículos con los semáforos y entre ellos en la vida real son comparables con las obtenidas en la gráfica velocidad vs tiempo.

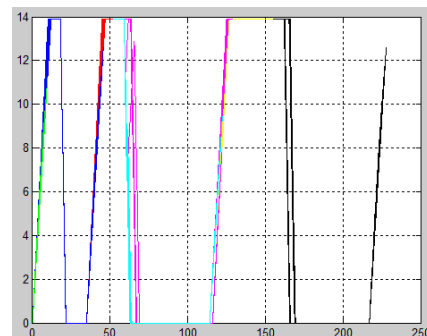


Figura 2. Gráfica de Velocidad vs Tiempo para el Modelo Original.

Ahora se configura un modelo controlado, en base a la estructura ANFIS desarrollada, en dicho modelo controlado

se logra que las velocidades promedio del flujo vehicular que circula en las secciones de la zona en estudio sean máximas. De diferentes pruebas realizadas usando el controlador ANFIS generado, se obtuvieron como datos de ingreso para alimentar al modelo controlado los valores que forman el siguiente vector de tiempos de desfase:

$$td=[0 \ 25 \ -24 \ 4 \ -1 \ 37 \ 10]$$

Las velocidades promedio obtenidas en las secciones de la zona en estudio, Tabla 1., fueron máximas (13.8889m/seg=50km/h correspondiente a la velocidad máxima permitida) a excepción de la velocidad promedio de la primera sección, esto se debe a que en esta los vehículos del pelotón se encuentran acelerando hasta llegar a la velocidad máxima. Gráficamente los vehículos que parten del reposo en la simulación se mantienen en un solo pelotón y pasan a través de todas las intersecciones sin detenerse ni disminuir su velocidad.

Tabla 1. Velocidades promedio por sección para el modelo controlado

Sección	v [m/seg]
6 Diciembre-D.Almagro	12.7653
D. Almagro-R. Victoria	13.8889
R. Victoria-J. León Mera	13.8889
J. León Mera-Amazonas	13.8889
Amazonas-9 Octubre	13.8889
9 Octubre-10 Agosto	13.8889

3.2 Resultados en el Simulador Profesional AIMSUN.

Primero se trabaja omitiendo las intersecciones no semaforizadas para poner a prueba los resultados del controlador ANFIS desarrollado, evaluar la respuesta del sistema ante este control, y posteriormente generar perturbaciones en el modelo tales como el incremento de un plan de transporte público y un incidente en la vía, para así mostrar cómo se ven afectados los resultados del plan de control fijado inicialmente.

A través de los resultados obtenidos de las simulaciones interactivas y presentados en la Fig. 3 y en la Tabla 2, se prueba que el controlador ANFIS mejora la velocidad promedio de la zona en estudio.

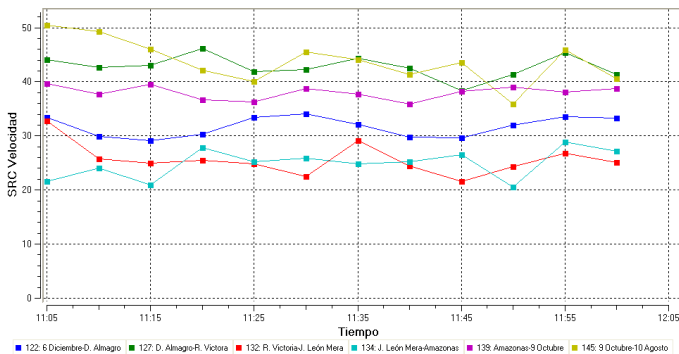


Figura.3. Velocidades por Sección del Sistema Controlado con un Plan de Transporte Público como Perturbación.

Nótese que dicho controlador se desarrolló en base a los datos de un modelo determinístico, el mismo que sirvió para implementar el Simulador de tráfico creado en MATLAB, y se validó en el software profesional de tráfico vehicular AIMSUN, que maneja modelos estocásticos en sus réplicas de simulación.

Tabla 2. Velocidades promedio por sección para el modelo controlado

	Velocidad Media [km/h]
Modelo Original	32.7
Modelo Controlado	37.2
Transporte Público	34.5
T. Público + Incidente	33.6

Luego se construye en AIMSUN una réplica más real de la Av. Colón entre las avenidas 6 de Diciembre y 10 de Agosto donde se consideren todas las intersecciones, semaforizadas y no semaforizadas. Para esta nueva condición se debe ajustar el plan de control, y los resultados de la simulación se evaluarán ante las mismas perturbaciones que en el modelo de simulación original.

En la Tabla 3 se nota que la velocidad media de la sección donde se configuró el incidente cae respecto a la mostrada en la simulación del modelo controlado. Sin embargo, dicha disminución no representa un cambio drástico en el comportamiento de las secciones en estudio como conjunto.

Tabla 3. Velocidad del Flujo Vehicular que Viaja a través de la Zona en Estudio

	Velocidad Media [km/h]
Modelo Original	31.1
Modelo Controlado	34.5
Incidente en la vía	33.5

4. CONCLUSIONES

Un modelo mesoscópico, determinístico de tráfico vehicular puede servir como punto de partida para el diseño, implementación y ajuste de planes de control fijos, que sean aplicados a modelos de tráfico vehicular reales de carácter microscópico. Los modelos determinísticos facilitan el procesamiento matemático de las variables que intervienen en sus interacciones.

La precisión de la arquitectura ANFIS al emular un sistema, al igual que la de cualquier técnica adaptativa, depende de la correcta selección del conjunto de datos con los cuales se genere y entrene la estructura, pues estos deberían recoger todas las características representativas del sistema.

La información recogida, sobre el comportamiento del tráfico vehicular de la zona en estudio, alimentó correctamente el modelo de simulación de AIMSUN para obtener una réplica aproximada del sistema real; y así evaluar diferentes planes de control.

No se presentó ningún inconveniente al aplicar los resultados, obtenidos en el controlador ANFIS y evaluados en el

simulador desarrollado en MATLAB, al modelo de tráfico vehicular construido en AIMSUN; puesto que las velocidades medias por sección mejoran en ambos casos.

Una característica favorable para el alivio del tráfico vehicular, que se puede apreciar en los resultados, es el alcance de velocidades medias por sección que además de un incremento respecto a las originales presenten uniformidad a lo largo de la zona en estudio.

5. REFERENCIAS

- [1] TOLEDO, B.A.; MUÑOZ, V.; ROGAN, J.; TENREIRO C., "Modeling Traffic through a sequence of traffic lights". *Physical Review E*. Vol. 70. pp. 0161071-0161076. 2004.
- [2] PEDRAZA, L. F.; HERNÁNDEZ, C. A.; LÓPEZ, D. A., "Vehicular Traffic Control using ANFIS". *Ingeniare*. Vol 20. pp.79-88. 2012.
- [3] CAL Y MAYOR, Rafael; CÁRDENAS, James, "*INGENIERÍA DE TRANSITO, Fundamentos y Aplicaciones*". Séptima Edición. Alfaomega. México 2000. Capítulo 10. Págs. 279 – 291.