

SISTEMA ADAPTATIVO DE CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DEL TRÁFICO DE UN CORREDOR VIAL SEMAFORIZADO. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE MEDELLÍN

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM AND OPTIMIZATION OF ROAD TRAFFIC IN A SIGNALIZED CORRIDOR

APPLICATION TO THE CITY OF MEDELLIN

MARGARITA JIMÉNEZ

Magíster (C), Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín margarita.jimenez@metropol.gov.co

IVÁN SARMIENTO

PhD, Profesor, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, irsarmie@unal.edu.co

Recibido para revisar Mayo 13 de 2011, aceptado Agosto 19 de 2011, versión final Agosto 29 de 2011

RESUMEN: Son tres los aspectos fundamentales a tener en cuenta en el diseño de un sistema de control adaptativo. El primer aspecto está vinculado con la naturaleza del fenómeno vehicular. Éste, lejos está de poder ser enfocado desde la perspectiva de un modelo determinista. El segundo aspecto, es inherente con una realidad física; teniendo en cuenta que las redes viales, cualesquiera sea su diseño y/o constitución, soportan un flujo vehicular máximo y una densidad máxima definida por sus dimensiones, número de carriles y condiciones del tráfico. Todo prueba, que por más perfeccionado que resulte el sistema, no es posible mejorar el rendimiento del flujo vehicular por unidad de tiempo, más allá de las limitaciones físicas impuestas por el diseño de la vía y las normas de circulación. De otro lado, los costos iniciales de inversión más los costos de operación y los costos externos relacionados con la eficiencia en el flujo de tráfico constituyen un tercer factor a tener en cuenta como consecuencia de los dos anteriores. Así mismo, la magnitud del costo dependerá en gran parte del grado de inteligencia que se asigne sobre la estrategia a implementar, de la tecnología a utilizar en la detección y del sistema de comunicaciones.

PALABRAS CLAVE: Flujo vehicular, algoritmos evolutivos, estrategias de control responsivo, estrategias de control sensibles al tráfico.

ABSTRACT: There are three key aspects to consider in designing an adaptive control system. The first aspect is related to the nature of the traffic phenomenon. This is far of being approached from the perspective of a deterministic model. The second, is inherent to a physical reality, considering that the road network, regardless of their design and / or establishment support a maximum traffic flow and a maximum density defined by their size, number of lanes and traffic conditions. All demonstrate, that more sophisticated than the system is, it is not possible to improve the performance of traffic flow per unit of time, beyond the physical limitations imposed by the road design and traffic regulations. On the other hand, initial investment costs plus operating costs and external costs related to the efficient flow of traffic are a third factor to consider as a result of the previous two. Likewise, the magnitude of the cost will largely depend on the degree of intelligence that is allocated on the strategy to implement the technology used in the detection and communication system.

KEYWORDS: Traffic flow, evolutionary algorithms, strategies of responsive control, sensible strategies of control to the traffic.

1. INTRODUCCIÓN

Las estrategias de control de tráfico en redes semaforizadas buscan maximizar la seguridad vial y minimizar el costo para sus usuarios, medido éste en términos de tiempos de recorrido y número de paradas. Cuando el tipo de control implementado es independiente de las condiciones del tráfico en cada

momento, se habla de *estrategia de tiempo fijo* (control en lazo abierto [1]), esta estrategia se originó en una etapa en que la computación y el desarrollo de las comunicaciones y la tecnología de detección no eran aún suficientes para proveer soluciones más ajustadas a situaciones complejas de variación de demanda y de interacción de redes semaforizadas. Ello no significa que dicha modalidad esté necesariamente obsoleta.

Esta investigación aborda el análisis en cada caso y determina si es posible resolver adecuadamente una determinada necesidad por medio de *estrategias de control con planes fijos* (con independencia de las variaciones de intensidad en el tiempo), o si por el contrario se requiere bien sea de *estrategias de tipo responsivo* (control por semiactuación o actuación total con activación dependiendo de la presencia de vehículos), o de *estrategias sensibles al tráfico* (control en lazo cerrado, [1]) cuyo algoritmo de control mide el estado (realimentación) del tráfico en cada momento, y esta información es utilizada para sincronizar las señales de control en tiempo real, (control adaptativo). Todo lo anterior, con el fin de medir el impacto en la movilidad, al usar diferentes estrategias para el control del tránsito.

2. OBJETIVO GENERAL

Determinar una propuesta metodológica con variables claves para desarrollar sobre un corredor vial arterial con tráfico interrumpido un Sistema Adaptativo de Control y Optimización del Tráfico, (SACOT), que ajuste el funcionamiento de los semáforos en tiempo real de acuerdo con el número de vehículos que llegan a un cruce, medidos en términos de densidad vehicular, y cuyos datos son procesados “On Line”

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se parte de la situación actual (corredor vial arterial que funciona mediante estrategia de control responsivo) en donde se dispone de una infraestructura vial urbana que se debe utilizar de manera óptima. Entonces, el problema es ¿Cómo ocupar en una red de intersecciones semaforizadas, el espacio en duraciones de tiempo que permitan minimizar la demora, con un cálculo en tiempo real?, y ¿Cómo conjuntamente resolver el interrogante mejor ciclo - mejor reparto del ciclo – y mejor desfase para una o varias intersecciones que conforman un corredor vial arterial?

Conceptualmente, el problema corresponde en términos matemáticos para una situación dada del tráfico a un modelo de optimización en tiempo real, de una función objetivo dependiente de un conjunto de variables (ciclo, duración de las fases, reparto del ciclo, y el desfase o instante del ciclo en que comienza la fase verde) que deben satisfacer ciertas restricciones.

Para el caso, la función objetivo será llevar la demora total y media a valores mínimos. Un análisis elemental permite comprobar que la complejidad del problema aumenta si se trata de determinar el valor de la función objetivo en tiempo real, y por ende también aumenta la complejidad de la solución al operar una red de semáforos con procesos **On-Line**, en vez de planes con procesos **Off – Line**, en donde el ingeniero de tráfico vincula cada uno de ellos a una situación particular del tráfico con una programación preestablecida, dependiente de la hora y del día de la semana. Visto este panorama, se analizan algunas características especiales del problema:

Dificultad para medir la demanda. Los “ojos” del sistema son los detectores instalados en los carriles de entrada o accesos a la intersección. Cuando dichos detectores están próximos a la línea de parada, la cola puede alcanzar con cierta frecuencia la posición de los mismos, invadiéndolos temporalmente, con lo que la información que suministra podría estar viciada, [2]. La posición contraria de ubicar el detector lo más lejos posible de la línea de parada queda anulada por el riesgo de que la cola crezca indefinidamente sin que exista la posibilidad de detectar tal situación hasta que se produzca la invasión. Sin embargo, la presente investigación, aborda la problemática con un tipo de detector que utiliza una suavización exponencial para calcular la tasa de ocupación vehicular, evitando que el detector quede invadido temporal, y/o permanentemente.

Dependencia entre variables. Las variables del modelo (ciclo - reparto y desfase) dependen unas de las otras. La incidencia sobre una cualquiera de ellas, modifica el valor de las restantes.

Objetivo inestable. Aún si se admite que la decisión óptima para un carril fuera calculable en tiempo real, la serie de acciones que se habrían de realizar en la red para poner en vigor tal propuesta podría provocar cambios en la demanda del carril, capaz de hacer inadecuada tal solución [2]. En definitiva se persigue un objetivo móvil.

4. FORMULACIÓN

Los sistemas de control de tráfico modernos incorporan una gran cantidad de elementos de hardware como

detectores, semáforos, reguladores, centrales, etc. Esto ha permitido aplicar sofisticados métodos de control, que, como el que aquí se trata, son capaces de modificar, en tiempo real, las temporizaciones actuales de los cruces en función de las características actuales del tráfico (Control Adaptativo). Entonces, el análisis involucra dos instancias, se parte de la creación de un control por semiactuación de la demanda (Control Responsivo) que refleje las condiciones actuales del corredor vial; adicionalmente se crea un sistema de control en tiempo real (Control Adaptativo).

4.1 Creación escenario con estrategia de control responsivo

Se eligió configurar con la plataforma de simulación Vissim, por ser este, dentro de la gama de modelos microscópicos, un modelo **estocástico** (Las leyes conocidas de causa-efecto están descritas por distribuciones de probabilidades, procesos al azar con indeterminancias en su evolución futura, es sabida la condición actual pero al final del proceso son muchas las posibilidades, sin embargo algunas trayectorias son más probables y otras menos)[3]. En contraposición con el modelo macroscópico del software Transyt 7F, desarrollado en Estados Unidos, que es determinístico (La relación **causa-efecto** se conoce en su totalidad, por ejemplo, representa todos los fenómenos que siguen las leyes de la física clásica). [4]

4.1.1 Localización

Al realizar un diagnóstico detallado de las condiciones de movilidad de la Avenida el Poblado en Medellín – Colombia (vía escogida para aplicar la estrategia), se eligió el tramo entre calles 5A - 7 y calles 4 Sur - 5 Sur, (Loma de los González), para evaluar el escenario actual base (estrategia de control Responsivo) a la luz de un modelo microscópico (desarrollado en Alemania por la casa Matriz PTV VISION, software Vissim), y que es utilizado para la calibración y validación a través de múltiples mediciones en campo de las condiciones de la hora de máxima demanda del corredor vial objeto de estudio. En particular la estrategia de control responsivo se implementa sobre dos cruces semaforizados de la Av. Poblado (carrera 43A) con calle 1 Sur (Loma de los Parras), y con calle 3 Sur (Loma de Alejandría). Sin embargo, fue necesario ampliar el número de intersecciones a modelar en la

medida que el tramo inicial no permitía conclusiones acertadas que se pudieran extrapolar para todo el tramo de análisis. En razón de esto fue necesario incluir los dos extremos de empalme de la vialidad, al norte, conformado por el nodo 1 (carrera 43A con calles 5A y 7), y al sur, constituido por el nodo 6 (carrera 43A con calles 4Sur - 5Sur); y de esta manera obtener resultados más realistas. Los dos extremos viales constituyen las condiciones de borde del modelo, que fueron simuladas con estrategia de tiempo fijo.

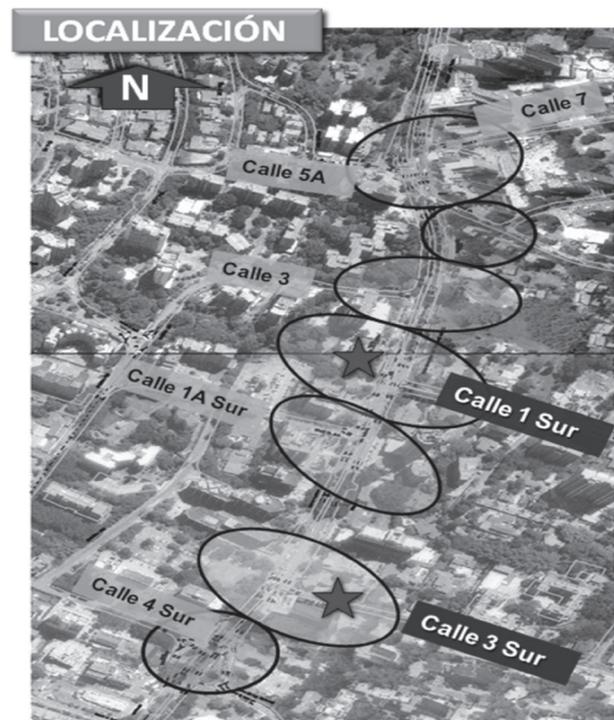


Figura 1. Localización
Fuente: Elaboración propia.

Por consiguiente, el modelo realizado está conformado por una longitud vial de aproximadamente 1 km de vía, para un total de 7 intersecciones, 4 de éstas operadas mediante dispositivos de semáforos (calles 5A-7, 1Sur, 3Sur, 4Sur_5Sur), y las restantes 3 intersecciones manejadas como cruces a prelación (calles 3, 1ASur, salida centro comercial San Fernando Plaza), tal como se observa en la Figura 1.

4.1.2 Estructuración escenario de control responsivo

a) Construcción red vial y procesamiento

La construcción de una red básica de modelación, que represente la red vial existente en la actualidad, se construye a través de las condiciones preestablecidas mediante la codificación de los nodos y arcos conformantes de una red, con su respectiva asignación de cargas de origen y destino, velocidades, distancias entre nodos, orden de faseamiento y tiempos intermedios como principales variables de entrada, entre otras. [3] y [5]. Ver Figura 2.

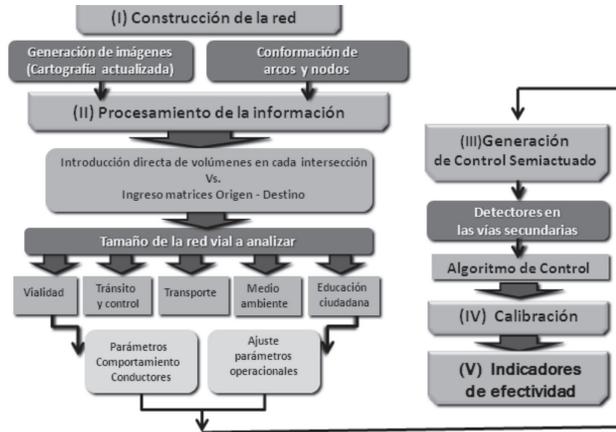


Figura 2. Estructuración escenario control responsivo
Fuente: Elaboración propia.

b) Generación de control responsivo

Es creado a partir de la lógica de programación VAP [5], que es un lenguaje propio del software VISSIM. Por definición VAP, es una interface que permite crear una lógica de control basada en las fases, y tiempos de transición de las fases, consecuente con la demanda vehicular y los controles de accionamiento de la señal. La lógica de control se describe en un archivo de texto, utilizando un lenguaje de programación simple. El mecanismo consiste en que durante la simulación se ejecuta VISSIM, VAP crea e interpreta los comandos de la lógica de control de la señal de la red VISSIM. Al mismo tiempo, diversas variables adquiridas mediante detectores reflejan la situación actual del tráfico mediante la simulación y procesamiento de la lógica VAP. Lo

anterior, es válido tanto al usarlo para un control Responsivo y/o control Adaptativo, ver numeral 3.2.3

c) Calibración y validación del modelo

Para realizar la calibración de los modelos de microsimulación, se deben elaborar tareas básicas como: La construcción de una red de modelación, que represente la red vial existente en la actualidad, y la obtención de flujos por movimiento y tipo de vehículo, que incorpora el volumen y estructura de la demanda actual en el sector. Al evaluar la red se incluye dentro de la construcción y calibración del modelo, una etapa denominada de precalentamiento, que consiste en alimentar el modelo con volúmenes vehiculares durante 15 minutos adicionales y previos, a los 60 minutos evaluados en la hora punta. Lo anterior, para lograr obtener un modelo lo más real posible a las condiciones de movilidad en la hora de mayor congestión

***Calibración de los flujos medidos en los arcos**

Para la calibración y validación del modelo, se realiza una comparación de los flujos sobre los arcos de medición, principalmente es relevante revisar los arcos de entradas y salidas del modelo, dado que la información de demanda incorporada en el modelo incluye los flujos medidos en los arcos de entrada. A continuación se presenta una comparación entre los volúmenes contados y modelados. La expresión estadística GEH se calcula como sigue:

$$GEH = \sqrt{\frac{(E - V)^2}{(E + V) / 2}} \tag{1}$$

Donde: *GEH* : Indicador estadístico

E : Volumen estimado modelo.

V : Volumen medido en campo.

Tabla 1. Criterio parámetros de aceptación para la calibración y validación de modelos.

CRITERIO DE MEDIDA	TOTAL CASOS ANALIZADOS	No. VECES QUE GEH < 5	No. VECES QUE GEH > 5	No. DE CASOS QUE CUMPLE	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE LA CALIBRACIÓN
GEH Static	33	28	5	85%	GEH Static < 5 en el 85% de los casos para volúmenes individuales de links

Fuente: Wisconsin DOT, District 2. Junio de 2002.

De la Tabla 1, se infiere, que el modelo construido mediante estrategia de control Responsivo, cumple con los estándares internacionales de calibración y validación, puesto que los resultados cuantitativos de los volúmenes del modelo, se ajustan a los datos reales de los volúmenes obtenidos en campo. El criterio de calibración y validación de los estándares locales establece $GEH < 10$, en el 85% de los casos para volúmenes individuales de links. Por tanto el modelo, cumple aún más con su calibración y validación.

Otros parámetros de calibración en la hora punta, que sirvieron como puntos de contraste del modelo, son las múltiples medidas de campo tomadas en referencia a las velocidades, y largos de cola, además de la elaboración de videos sobre la vía estudiada, que reflejen el comportamiento de los conductores

de la ciudad de Medellín, (ejemplo: la circulación en zig-zag principalmente de las motos y algunos vehículos, sobre los carriles viales), y que permite su incorporación en el modelo y por ende influyen en la calibración y validación del mismo bajo la estrategia de control responsivo, (fundamentado en el modelo de seguimiento Widemann 74). [3].

***Comparativo de velocidades**

El resultado de velocidad del modelo para la situación actual, corresponde a un valor de 12,0 km/h. Lo que significa que al contrastar la velocidad registrada experimentalmente en campo (Técnica del vehículo flotante [6]), frente a la velocidad del modelo base, se encuentra una buena aceptación de tal parámetro. Ver tabla 2.

Tabla 2. Comparativo velocidad del modelo vs velocidad medida en campo

Velocidad Modelo (Km/h)	Velocidad campo (Km/h) (Método vehículo flotante)	Diferencia	Diferencia %
12,0	12,75	0,75	5,8%

Fuente: Elaboración propia. Mediciones de campo. Hora pico. Año 2010

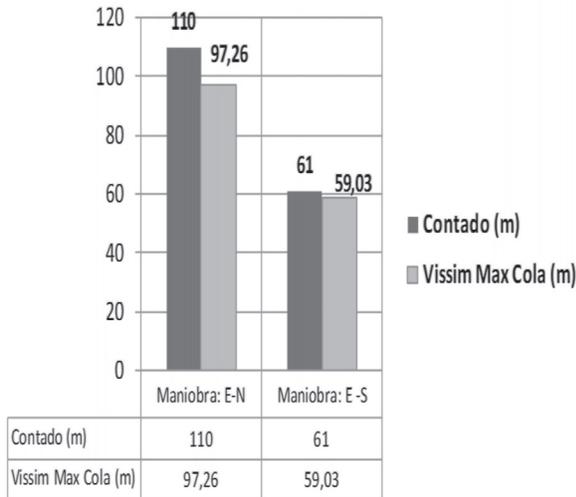


Figura 3. Largos de cola. Cr 43A con Cl 1Sur.

Fuente: Elaboración propia.

***Comparativo por largos de cola**

Se muestra un comparativo de la longitud de cola máxima medida en terreno, versus la máxima longitud de cola arrojada por el modelo. Las mediciones se realizan en campo en los ingresos de las respectivas intersecciones, que conforman la red vial, mientras el

semáforo vehicular permanecía en rojo, en la franja horaria de las 17:45 – 18:45.

4.1.3 Resultados indicadores de efectividad

Una vez se obtenida la calibración del modelo con estrategia de control Responsivo, en forma tal que el modelo represente la realidad lo más fiel posible, se ilustran algunos de los principales indicadores logrados, a través del software:

Para el parámetro “Average delay time per Vehicle [s]”, el modelo arroja un resultado de 142,76 segundos. Este parámetro explica la demora promedio por vehículo en la red evaluada para la franja horaria pico, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Average delay time per Vehicle [s]} = \frac{\text{Tiempo Total demora}}{\text{veh_activos} + \text{veh_llegaron}} \quad (2)$$

El desempeño para todos los vehículos de toda la red evaluada en cuanto al indicador cuya leyenda corresponde “Average number of stops per vehicles”, indica un número promedio de paradas por vehículo de 3,99 paradas/vehículo”. Su expresión matemática está dada por:

$$\text{Average_number_of_stops_per Vehicle} = \frac{\text{Número Total d Paradas}}{\text{veh_activos} + \text{veh_Llegaron}} \quad (3)$$

4.2 Creación Escenario Estrategia Control Adaptativo

El diseño técnico de control nace, o se deriva de los requerimientos de la ingeniería de tráfico, que para dar respuesta se combina con tecnología de avanzada.

4.2.1 El Modelo

Partiendo del modelo creado para calibrar la subred mediante algoritmo con estrategia de control responsivo, se elabora un modelo que opere con estrategia de control adaptativo para las condiciones locales de la ciudad de Medellín, en particular para la subred evaluada, *al implementar varios detectores sobre la vía principal y secundaria*. El modelo se fundamenta, en proponer periódicamente (al menos una vez por cada paso del tiempo) ligeras modificaciones de las temporizaciones vigentes con el objeto de ajustar la oferta de los semáforos a las condiciones de la demanda del tráfico reflejadas en los perfiles de demanda. Se destacan los siguientes elementos: un controlador local encargado de procesar la información suministrada por los detectores asociados a dicho cruce, que toma sus propias decisiones al realizar propuestas de temporización para cada cruce de semáforos ajustados a la demanda, varios controladores de zona, que actúan como sistemas intermediarios en el proceso de comunicaciones, y finalmente una central de tráfico, que gestiona las comunicaciones, su función es supervisar que todo opere correctamente, que las bitácoras estén en condición aceptada, y verifica que los planes de los controladores sean adecuados al garantizar un apropiado sincronismo y buena movilidad. [2].

4.2.2 Desarrollo de algoritmo control

Es necesario para describir el control de la(s) intersección(es) que operan mediante un sistema de estrategia de control adaptativo, establecer determinaciones claras e inequívocas para la programación del software del equipo de control. El algoritmo de control se debe determinar en detalle por cada segundo y está influenciado directamente por las condiciones del entorno. [7]

Un control de estrategia adaptativo creado con lógicas propias en un modelo microscópico computacional

como lo es el Vissim requiere de la interfaz VAP (Vehicle Actuated Programming) o VISVAP, según se desee para el tipo de aplicación de cada caso a estudiar. También se pueden acoplar módulos complementarios al Vissim, con lógicas de control de señales ya prediseñadas incluyéndose los casos de SCAT (de procedencia australiana), SCOOT (de origen inglés), etc. [5]. Para esta investigación, se eligió VAP.

Lógica de control VAP: Dentro de la lógica VAP, son dos los aspectos más relevantes:

Creación de un control propio VAP para controladores de señal.

Se puede establecer el tipo VAP mediante el menú CONTROL DE SEÑAL (SYGNAL CONTROL), y luego buscar el menú edición de controladores (Edit Controllers). Para especificar los archivos, se selecciona el controlador (VAP) de la lista que aparece en el cuadro de dialogo. No obstante, para la creación de la lógica de control es necesario disponer del archivo VAP216.DLL, el cual se especifica como archivo de programa en dicho menú. Adicionalmente, debe crearse un archivo de definiciones de la lógica (*.VAP) y un archivo que contiene las diferentes fases (*.PUA) y ambos deben ser seleccionados. Además, los grupos de señal, y los detectores deben ser previamente definidos. [5]

- *La generación de un archivo *.PUA*

La definición de los grupos de señal, fases, y tiempos de transición, se define en el archivo *. PUA. Puede ser editado de forma manual (Block de notas), o exportado desde otro programa que proporcione estos datos. A modo de ejemplo, el programa CROSSIG de la compañía PTV AG, ofrece una función de exportación para crear archivos *. PUA. [5]

4.2.3 Resultados

La construcción de un sistema que opere mediante estrategia de “control adaptativo” necesita un considerable esfuerzo técnico con respecto a la adquisición y procesamiento de datos que son relevantes para cada situación del tráfico. Para lograr dicho objetivo, se efectuaron simulaciones, junto con la formulación de un algoritmo propio y específico en lenguaje de programación VAP, que permitiera

la modelación. En efecto, se ejecutaron múltiples “corridos” de las cuales se eligieron las 5 de mayor significación, a fin de que pudieran representar a través del modelo las condiciones más cercanas posibles a la realidad, si se migrase a este tipo de tecnologías. Consecuentemente con esto, las variables más sensibles en cada una de las simulaciones estuvieron basadas en el *grado de ocupación de los detectores* sobre la vía principal y la vía secundaria, *el tiempo de verde mínimo*, y la *creación de minifases* según la activación de la demanda vehicular a través de los detectores.

De las 5 simulaciones elegidas, se escoge la que mayor eficiencia otorga a la red en términos de disminuir las demoras promedio en las intersecciones, reducir los tiempos de viaje, controlar las longitudes de cola, eliminar las deficiencias en la coordinación; y de esta manera lograr un mejor uso de las reservas de capacidad en las intersecciones. Lo anterior, teniendo en cuenta que el algoritmo para el control adaptativo es sensible a la disminución de la densidad de tránsito, al aumentar la separación de los vehículos, cediendo el paso a la calle secundaria. También reacciona cuando vuelven a aparecer vehículos más juntos entre sí, para volver el verde a la vía principal. El resultado natural es lograr un movimiento coordinado a una velocidad y espaciamiento naturales dentro de las condiciones imperantes de movilidad del corredor vial estudiado

Tabla 3. Comparativo indicadores de desempeño

SIMULATION TIME FROM 900.0 TO 4500.0.	ESTRATEGIA CONTROL SEMIACTUADO	ESTRATEGIA CONTROL ADAPTATIVO
PARAMETER	VALUE	VALUE
Average delay time per vehicle [s], All Vehicle Types	142,76	130,61
Average number of stops per vehicles, All Vehicle Types	3,99	3,65
Average speed [km h], All Vehicle Types	12	13
Average stopped delay per vehicle [s], All Vehicle Types	85,12	75,82
Total delay time [h], All Vehicle Types	266,04	248,85
Total Distance Traveled [km], All Vehicle Types	4.400,50	4.577,06
Latent delay time [h], All Vehicle Types	140,81	118,70
Latent demand, All Vehicle Types	1418	1251
Number of Stops, All Vehicle Types	26786	25011
Number of vehicles in the network, All Vehicle Types	359	353
Number of vehicles that have left the network, All Vehicle	6350	6506
Total stopped delay [h], All Vehicle Types	158,62	144,46
Total travel time [h], All Vehicle Types	366,43	353,53

Fuente: Elaboración propia. Año 2010.

La tabla 3, presenta los resultados de desempeño de los parámetros de un modelo diseñado con estrategia

de control adaptativo, para la hora punta del día. Para los indicadores de efectividad, el valor negativo, advierte una reducción (o grado de mejoramiento) en el porcentaje de cada uno de los parámetros referenciados, que se traduce en un mejoramiento de las condiciones del sistema de la red evaluada, mediante Control Adaptativo

5. CONCLUSIONES

A nivel general se visualiza el tipo de herramientas tecnológicas necesarias o requeridas para la gestión del tráfico de una ciudad como Medellín, con 2,2 millones de habitantes y arterias urbanas con cerca de 5000 veh/hora/sentido por calzada. De la misma forma se extraen conclusiones con respecto a la pertinencia de la utilización de estrategias de control adaptativo como los mecanismos de mayor utilidad, en este sentido se concluye:

Es necesario diseñar, modelar e implementar sistemas que hagan uso de capacidades típicas de los sistemas de inteligencia artificial con adaptabilidad al medio con el que interactúan, procesos de razonamiento para planificar las tareas a realizar ante situaciones no previstas, o flexibilidad en su comportamiento y que, al mismo tiempo, sigan garantizando las restricciones temporales de las tareas de tiempo real crucial. Al intentar resolver estas dos necesidades se observa que las capacidades para la resolución de problemas complejos, típicos de las técnicas de inteligencia artificial, se basan en la utilización de mecanismos con tiempos de ejecución *no deterministas*, que van de la mano con la propia naturaleza del fenómeno de tráfico vehicular, pues éste, lejos está de poder ser enfocado desde la perspectiva de un modelo determinista, porque siempre estará presente el componente humano que genera alto grado de incertidumbre. El problema que aparece es que en la actualidad en la mayoría de los casos las soluciones al tránsito vehicular están fundamentadas en modelos determinísticos en vez de estocásticos.

Consecuentemente, esta interpretación permite introducir inteligencia; se hace un llamado a las autoridades locales en materia de tránsito y transporte para que migren sus estrategias de control hacia tecnologías en tiempo real que mediante la utilización de controles y algoritmos adecuados mejoren el comportamiento global del sistema vial en valores cercanos al 8% si las vías ya están congestionadas, o quizá en mas, si todavía los niveles de congestión no son altos.

- Con base en esta investigación se da un reconocimiento a los Sistemas de Control de Tráfico Adaptativo en el sentido de producir un alivio de la congestión del tráfico urbano durante la hora de máxima congestión, mejorando el rendimiento de los indicadores de movilidad dentro del tramo vial particularmente estudiado, es decir, se comprueba que al modelar redes de semáforos donde se mezclan varias estrategias de control, la tecnología On_Line funciona adecuadamente, bien sea si se tienen de manera cercana intersecciones controladas con pare, con estrategia de control fijo, y/o con estrategia de control semiactuado (control responsivo). Lo anterior se evidencia en el ejercicio desarrollado a través de las condiciones de borde expuestas para el modelo (intersecciones de los extremos de la malla vial controlados mediante estrategia de tiempo fijo), y de las intersecciones controladas con pare que están localizadas de manera muy próxima a las intersecciones manejadas con un Sistema de Control Adaptativo. En resumen se comprueba que el control adaptativo es útil para interconectar una intersección con un sistema progresivo de tiempo fijo o semiaccionado, cuando hay altos volúmenes.

RECOMENDACIONES

- - Es importante recalcar que las aplicaciones mediante control con estrategias sensibles al tráfico en países desarrollados, tienen una connotación distinta a si se aplicasen en países en vía de desarrollo, porque a pesar de que en ambos casos se logre disminuir la congestión, las aplicaciones de estos sistemas en las grandes ciudades de los países en vía de desarrollo son únicas, debido a que éstas ciudades se enfrentan a problemas de transporte más graves que las ciudades de países desarrollados, dado que tales ciudades están creciendo mucho más rápido que las de los países desarrollados. La media de crecimiento anual de población en los países en vías de desarrollo se estima alrededor del 3% - 5%, en comparación con el 0,7% o menos en los países desarrollados. Por lo que su aplicación tiene mayor grado de complejidad.
- Como recomendación final se presenta el hecho de que Medellín hace parte de una conurbación ubicada en un valle estrecho que tiene una longitud de 60 km, es una ciudad conformada por 2,2 millones de habitantes, que hace parte de una región metropolitana de 3,5 millones de habitantes. Esta región soporta al día una movilidad diaria de cerca de 5 millones de viajes distribuidos en bicicleta 1%, bus de empresa y escolar 4%, a pie 28%, moto 5%, Metro 9%, taxi 10%, auto 13%, bus-buseta-microbús 30%[8]. Por tanto una ciudad con tan altos viajes al día no puede seguir siendo manejada con estrategias de control utilizadas en ciudades relativamente pequeñas como Pereira, Manizales o Ibagué que apenas superan el medio millón de habitantes. En la ciudad de Medellín convergen demandas vehiculares propias de la ciudad región compuesta por tres pisos Valle de Aburrá, Valle de San Nicolás, y la zona occidental, lo que hace necesario la implantación de estrategias adaptativas en corredores semaforizados.

6. REFERENCIAS

- [1] Ñañez, P., y Quijano, N., Forraje Social en Control de Tráfico Urbano. Revista Oficial de ITS Colombia Andina Traffic, No.4, pp 55 – 60, Santafé de Bogotá, Colombia, 2008.
- [2] López, S., García, M., Hernández, P. y Hernández, A., Control Inteligente de Redes Urbanas de Tráfico. Centro de Inteligencia Artificial de la Ciudad de Oviedo. Gijón, España, 2000.
- [3] PTV, Planung Transport Verkehr AG. Manual de Vissim 5.30, Alemania, 2010.
- [4] Robertson, D., Transyt Method for Area Traffic Control. McTrans Center University of Florida, Florida, Estados Unidos, 1969.
- [5] PTV, Traffic Mobility Logistics, VAP 2.16. Interface Use Manual. Karlsruhe, Alemania, 2008.
- [6] Box, P. y Oppenlander, J., Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito. Asociación Mexicana de Ingeniería de Transportes A. C. México, 1985.
- [7] Road and Transportation Research Association Steering Committee Traffic and Traffic safety, Norma RILSA. Actualización año 2003, Alemania, 2003.
- [8] Area Metropolitana del Valle de Aburrá, Acuerdo Metropolitano N° 042. (28, noviembre, 2007), Por el cual se adopta el Plan Maestro de Movilidad. Medellín. Colombia, 2007.