



## ESQUEMA DE MODELADO Y SIMULACIÓN PARA UN SISTEMA DE TRÁFICO CON ENFOQUE DE SISTEMAS DINÁMICOS

Angélica Meléndez Castro<sup>a</sup>, José Antonio Cárdenas Valderrama<sup>b</sup>, Domingo Cortés<sup>c</sup>

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., [angelica.melendez.castro@gmail.com](mailto:angelica.melendez.castro@gmail.com)<sup>a</sup>, [cardenas.v@live.com.mx](mailto:cardenas.v@live.com.mx)<sup>b</sup>, [domingo.cortes@gmail.com](mailto:domingo.cortes@gmail.com)<sup>c</sup>

### RESUMEN

Generalmente, las decisiones para mejorar el sistema de tráfico en una ciudad, se toman en base a consideraciones heurísticas. Así decisiones como ampliar una calle, establecer rutas de transporte público, etc., se basan en la observación, tiempo de viaje, presión de los distintos agentes sociales, etc.

Usualmente no se considera que un sistema si puede modelarse de la misma manera que se modelan otros sistemas en ingeniería, como son los motores de circuitos electrónicos, posición y control de velocidad, etc. Sin embargo, el enfoque de sistemas dinámicos del mismo tipo de sistemas que pueden modelarse con herramientas matemáticas estándar de ingeniería como son las ecuaciones diferenciales.

En este trabajo se desarrolla un modelo con base en el enfoque de sistemas dinámicos para el tráfico urbano. Dicho sistema, es un sistema complejo, no lineal, con múltiples variables, como son: tiempo de viaje promedio, volumen de tráfico, capacidad actual de las calle, capacidad de la autoridad para construcción de carreteras, costo y condiciones de transporte público.

No obstante, la complejidad del sistema en este trabajo se mostrará que con el enfoque de sistemas dinámicos puede facilitarse su análisis y comprensión. Se muestra además que con el modelo desarrollado pueden realizarse proyecciones sobre los efectos que podrían tener los cambios en las variables del sistema. De tal manera que el modelo se puede emplear para diseñar, experimentar, medir y sugerir alternativas o políticas para mejorar el funcionamiento del sistema de transporte.

### 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de las grandes capitales del mundo, el flujo vehicular se ha incrementado constantemente, no obstante, 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 una vía excede el volumen máximo que puede pasar por ellos, este problema produce efectos indeseados en la movilidad de los conductores y peatones. Por lo tanto, el modelado del tráfico urbano con un enfoque de sistemas dinámicos es una herramienta muy importante para el análisis, control y la toma de decisiones para mejorar la congestión vehicular y beneficiar así la calidad de vida de las personas, el medio ambiente y la economía de la ciudad.



Aunque el estudio de los sistemas dinámicos y el control de los mismos, se originó en la física, las matemáticas y la ingeniería [1], las ideas fundamentales se aplican en las más diversas áreas. En ingeniería en particular, las técnicas de lo que hoy se conoce como control clásico se fueron desarrollando lentamente a lo largo del siglo XX. Con la invención de la computadora, el estudio de sistemas discretos adquirió auge. Posteriormente, a la teoría de control se fueron incorporando, el estudio de sistemas no lineales [5], [9], sistemas discontinuos [7], sistemas híbridos [3], sistemas a eventos discretos [1] hasta llegar al panorama actual, en que las ideas de sistemas dinámicos se pueden aplicar en casi cualquier área.

Un paso importante en la diversificación de las áreas de aplicación de sistemas dinámicos se dio en el Instituto Tecnológico de Massachusetts hace casi medio siglo. Los iniciadores de esta escuela introdujeron la base que unificó los conceptos de los lazos de retroalimentación y retardos, de la teoría de control, con áreas como política corporativa, en el área médica-social la propagación de enfermedades, el crecimiento de áreas urbanas y las interacciones de la población, contaminación, industrialización, recursos naturales y alimentos [2], [8], [5].

## 2. TEORÍA

La dinámica de sistemas es un método para mejorar el aprendizaje en los sistemas complejos. Aprender acerca de los sistemas dinámicos complejos requiere algo más que herramientas técnicas para crear modelos matemáticos. La dinámica de sistemas es fundamentalmente interdisciplinaria. La dinámica de sistemas se basa en la teoría de sistemas no lineales y control de retroalimentación, desarrolladas en las matemáticas, la física y la ingeniería. Aplicamos estas herramientas para describir el comportamiento de los humanos, así como los sistemas físicos y técnicos, la dinámica del sistema se nutre de la psicología cognitiva y social, la economía y otras ciencias sociales. Así construimos modelos de sistemas dinámicos para resolver importantes problemas del mundo real, tenemos que aprender a trabajar de manera efectiva con los grupos de responsables políticos ocupados y cómo analizar el cambio sostenido en las organizaciones [4].

Al igual que muchos sistemas dinámicos, los medios físicos y estáticos del tránsito, tales como carreteras, calles, intersecciones, terminales, etc., están sujetos a ser cargados por un volumen de tránsito, con características espaciales y temporales, es decir ocupan espacio y se producen en intervalos de tiempo. Estas distribuciones son interpretadas como la necesidad de las personas de desplazarse a través de un espacio y un determinado tiempo. Al proyectar una calle, avenida, paso peatonal o similar, es de suma importancia determinar el volumen de tránsito que circulara, a lo que se suma la variación, tasa de crecimiento y de su composición, errores durante esta fase llevan a que el proyecto sirva por escaso tiempo, o que no sea la solución buscada.

Para iniciar con el análisis del tráfico se necesita conocer las variables que forman parte del sistema, como son:

- Volumen del tráfico, expresa el número de vehículos que circulan por un punto en un intervalo de tiempo.
- Capacidad de la carretera, es el número máximo de vehículos que el sistema puede soportar durante un tiempo específico, en un punto determinado. Es una característica del sistema vial y representa su oferta.



- Demanda, es el número de vehículos que desean movilizarse y pasan por un punto en un tiempo específico. Donde existe congestión la demanda es superior al volumen.

Estos términos en su conjunto forman una dinámica de tráfico, que define la cantidad de vehículos que esperan ser servidos (demanda), distintos de los que son servidos (volumen) y de los que pueden ser servidos (capacidad), con esto se determina que cuando la demanda es menor a la capacidad, el volumen es igual a la demanda.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

La solución tradicional al problema de la congestión ha sido la construcción de carreteras, pero ¿qué sucede cuando se construyen nuevas carreteras?, el modelo para medir la congestión se centra en el tiempo de viaje promedio ( $t_{vp}$ ). El  $t_{vp}$  representa la relación entre la capacidad de la carretera ( $c_c$ ) y el volumen del tráfico ( $v_t$ ).

La congestión se mide con base al tiempo de viaje promedio, el cual depende del equilibrio entre la capacidad de las carreteras y el volumen del tráfico, esto se observa en la figura 3.1.

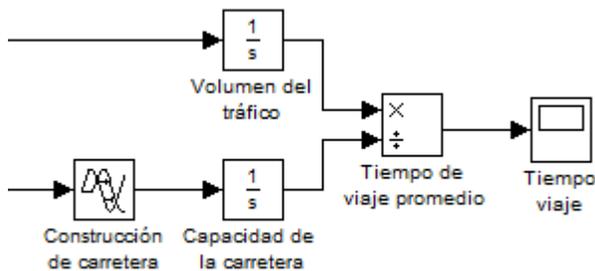


Figura 3.1 Modelo del  $t_{vp}$

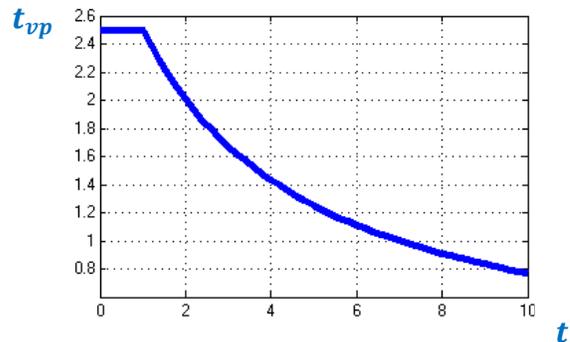


Figura 3.2 El  $t_{vp}$  disminuye

A medida que el número de vehículos en las carreteras aumenta, teniendo en cuenta la capacidad de las carreteras, el viaje promedio tomará más tiempo. Para disminuir el tiempo de viaje promedio existe una presión para reducir la congestión, como inicialmente se menciona, la construcción y mejora de las carreteras aumentan la capacidad y esto ocasiona que un mayor volumen de automóviles circulen con un tiempo de viaje deseado, pero la construcción genera un retraso entre el inicio de un proyecto de construcción y aumento de la capacidad de la carretera. Como la capacidad de la carretera se eleva, el tiempo de viaje promedio caerá, esto se puede observar en la figura 3.2.

En la figura 3.3 se observa el modelo del tráfico, tomando en cuenta que existen otras variables dentro del mismo sistema que facilitan el análisis y comprensión para la toma de decisiones. La construcción de carreteras debe tener un límite ya que una ciudad no se conforma solo de autos y carreteras, sino también existen edificios, casas y construcciones.

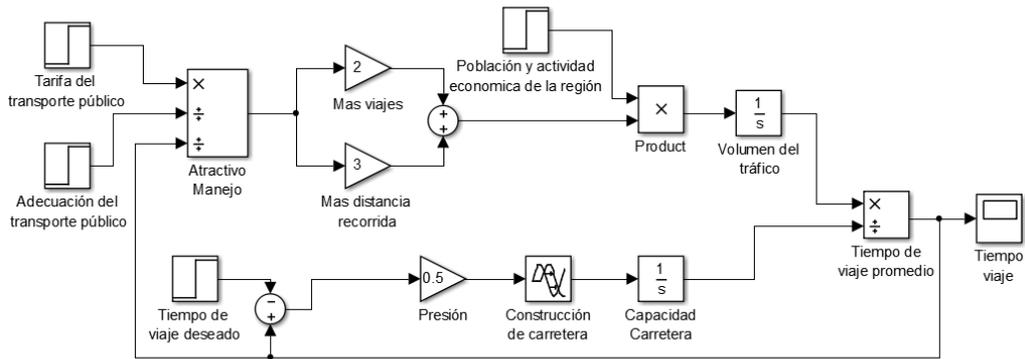


Figura 3.3 Modelo del sistema de tráfico

La presión para reducir la congestión sucede cuando el tiempo de viaje promedio es mayor al tiempo de viaje deseado. La construcción de carreteras no es la única política a considerar, también existe el uso del transporte público, donde se centran en el atractivo de manejo, esto se refiere al medio de transporte que la población usará para trasladarse. Cuando el tiempo de viaje promedio aumenta, el uso del automóvil no es lo ideal para usar como medio de transporte, es por ello que existen mejoras al transporte público, que convencen a la población de usarlos como una alternativa al uso de auto propio. El enfoque de sistemas dinámicos permite observar el modelo de tráfico como causa-efecto, cuando la población decide usar el transporte público, el volumen de autos disminuye.

Con el paso del tiempo es viable usar nuevamente el automóvil como medio de transporte porque el tiempo de viaje promedio es el deseado. La población observa que el tiempo de viaje se reduce y dependiendo de la actividad económica comienzan a adquirir un automóvil, esto aumenta el volumen de autos en la ciudad y por lo tanto el tiempo de viaje va creciendo. En la figura 3.4 y 3.5 se observa la respuesta del sistema, considerando las diferentes variables que existen en la figura 3.3. Este modelo permite un análisis de las políticas a considerar para disminuir la congestión, es decir, debe existir un equilibrio entre la capacidad de las carreteras y el volumen del tráfico.

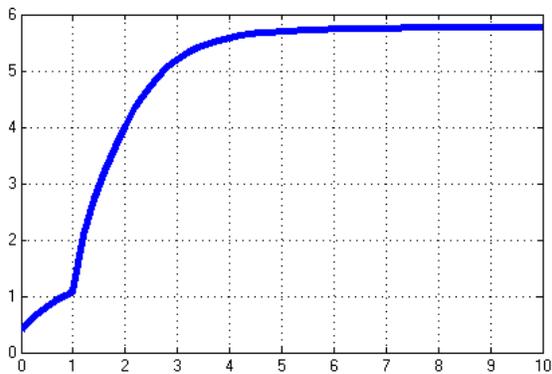


Figura 3.4 El  $v_t < c_c$

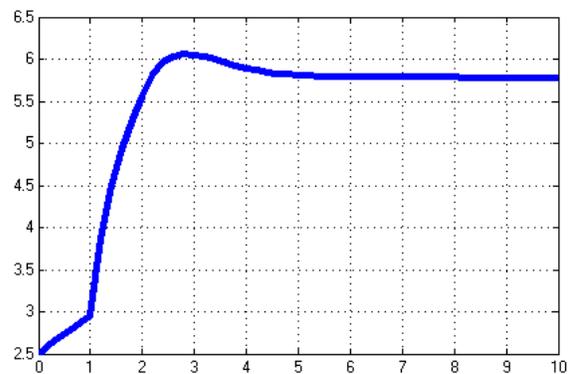


Figura 3.5 El  $v_t > c_c$



#### 4. CONCLUSIONES

El modelo anterior muestra que controlar la congestión a través de la construcción de carreteras es una estrategia que en un periodo de tiempo no es viable. Cualquier reducción de la congestión conduce a más viajes y más coches. Lo que la construcción de carreteras controla en realidad es el tamaño de la zona metropolitana y el número de coches en la carretera.

Como el número de vehículos y las necesidades de transporte crecen, las ciudades del mundo muestran serios problemas de congestión de tráfico en sus carreteras. Los costes incluyen pérdida del tiempo de trabajo y del tiempo libre, aumento de consumo del combustible, contaminación, problemas de salud, estrés y malestar, en general. Además, la congestión retarda el movimiento de mercancías y de servicios, de tal modo que, aumenta el precio de los productos y reduce la competitividad de los negocios. En general hay diferentes métodos para afrontar el problema de congestión de tráfico:

- Construcción de nuevas carreteras o ampliación de las ya existentes (para eliminar los cuellos de botella o para realizar nuevas formas de incorporación).
- Estimular tanto el uso del transporte público como una ocupación mayor en los vehículos por medio de precios y tasas apropiados.
- Regular y redirigir el flujo de tráfico usando medidas tales como: paneles dinámicos con información de las rutas (que indican velocidades apropiadas, direcciones preferentes, o información de la longitud y duración de las caravanas), control de semáforos en entornos urbanos, es decir frecuencia variable en el cambio de luces para proporcionar una circulación suave y evitar largas colas en unas calles y circulación escasa en otras. Nosotros, pretendemos afrontar el problema de congestión de tráfico usando este último método, es decir, confeccionando un modelo para control de semáforos en un entorno urbano.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. Anthony N. Michel, Ling Hou, Derong Liu. “*Stability of Dynamical Systems: Continuous, Discontinuous and Discrete Systems*”. Birkhauser, November 2007, Boston ISBN: 0817644865.
2. Forrester Jay. Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers. *Harvard Business Review*. 36(4):37-66, August 1958.
3. Goebel Rafal, Sanfelice Ricardo G., Teel Andrew R. *Hybrid Dynamical Systems*. Princeton University Press, February 2012. ISBN: 0691153892.
4. John D. Sterman. “Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex”. The McGraw-Hill Companies. February 2000, USA ISBN: 007238915X
5. Khalil Hassan K. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, December 2001. ISBN: 0130673897
6. Kaufman Josh. *The Personal MBA*. Portfolio Hardcover, December 2010, USA. ISBN: 1591845577.
7. Luo Albert C.J. *Discontinuous Dynamical Systems*. Higher Education Press, August 2012, Beijing. ISBN: 3642224601.
8. Meadows Donella H. *Thinking in Systems: A Primer*. Chelsea Green Publishing, December 2008, USA. ISBN: 1603580557.
9. Strogatz Steven H. *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Westview Press, January 2001. ISBN: 0738204536.