

Control óptimo de la regulación de semáforos

Pedro Sánchez Martín¹, Rafael Palacios Hielscher¹

¹ Instituto de Investigación Tecnológica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
Universidad Pontificia Comillas de Madrid. Alberto Aguilera, 25, 28015. Madrid.
pedro.sanchez@upcomillas.es, rafael.palacios@iit.upcomillas.es

Palabras clave: Control óptimo, Simulación, Semáforos

1. Gestión del tráfico urbano

En las grandes ciudades la gestión del tráfico urbano se realiza desde centros de control donde se monitorizan a diario las congestiones y se resuelven incidencias, Onodera (1999). Un recurso habitual para gestionar más eficazmente el tráfico en tiempo real consiste en el control y regulación de los cruces mediante semáforos. En la regulación de cada cruce se reparte el tiempo de apertura en función de la intensidad del tráfico y de la importancia de las vías que confluyen en el cruce.

Generalmente, la regulación de los semáforos parametriza la amplitud de las ventanas de apertura en función del día de la semana y según los tramos horarios del día. Lógicamente, la regulación aumenta las ventanas de apertura en las vías con mayor intensidad de tráfico y las disminuye en las vías más descongestionadas o menos importantes, De Schutter, B. (1999). No obstante, se puede mejorar la calidad de la regulación si se controla en tiempo real teniendo presente las características específicas de cada cruce y su interrelación con el resto de cruces adyacentes.

Una manera habitual de obtener información sobre el nivel de congestión en un cruce se realiza mediante la instalación de bobinas de inducción en la calzada. Éstas se utilizan para detectar la presencia de vehículos parados a distancias diferentes del cruce. Sin embargo, también se puede desarrollar un sistema basado en cámaras cuya instalación resulta más sencilla y puede aportar más información. Mediante técnicas de visión artificial el sistema aporta información sobre el número de vehículos en espera e incluso sobre el tipo de vehículo (emergencia, transporte público...).

El tratamiento en tiempo real de la información permite que las ventanas de apertura puedan variar siguiendo una lógica de control que considera variables externas como el número de vehículos en cola en cada vía y parámetros propios del cruce como la prioridad de las vías para vehículos y peatones.

El trabajo que se presenta en este artículo describe el diseño y validación del control óptimo de la regulación de distintos tipos de semáforos. Dicho diseño utiliza conocimientos de regulación automática, y aplica técnicas y herramientas de simulación para la evaluación de los resultados.

El trabajo ha sido realizado partiendo de un estudio de campo en un cruce de la ciudad de Madrid con el fin de modelar y validar lo más fielmente posible el proceso de llegada de coches al semáforo, así como variar las ventanas de apertura y cierre de semáforos partiendo de las que actualmente existen. Para poder evaluar los diferentes controles de tráfico se

utilizan técnicas de simulación dada la naturaleza dinámica de este tipo de sistemas, Barceló (1994).

2. Modelado de la gestión del cruce de tráfico

El modelado del cruce mediante simulación ha partido de la observación de un cruce real entre las calles José Abascal y Alonso Cano en plena ciudad de Madrid y señalado en la Fig. 1. La calle José Abascal dispone de cinco carriles y la de Alonso Cano de uno solo. Ambas son unidireccionales y tienen una intensidad elevada de tráfico en días laborables.



Fig. 1. Cruce de calles José Abascal y Alonso Cano

Tras la toma de tiempos realizada en el cruce las llegadas de vehículos se modela como un fenómeno de rachas provenientes de cruces previos al modelado. El número de vehículos por racha se ajusta a una distribución discreta binomial y el tiempo entre vehículos consecutivos en cada racha se ajusta a una distribución exponencial diferente en función del carril de llegada al semáforo. Ambos tipos de ajuste se han validado mediante el test de la Chi cuadrado.

Se ha comprobado que la llegada de vehículos es diferente dependiendo del carril de que se trate debido por ejemplo a que los carriles laterales son compartidos por turismos y transporte público. Así mismo, los carriles centrales suelen ser los que tienen mayor densidad de tráfico debido a que la llegada de vehículos procedentes de cruces previos se realiza preferentemente en esos carriles.

El funcionamiento del semáforo se modela con dos estados – rojo y verde – y se prescinde del estado ámbar ya que para la gestión del volumen de tráfico en espera no resulta de interés su modelado. Previo al cambio del semáforo del rojo al verde se contabiliza mediante un sistema de visión artificial el número de vehículos en cola. Esta información se incorpora al sistema de control de las ventanas de apertura y cierre de los semáforos de dicho cruce.

3. Esquema y diseño del control

La regulación del cruce considera las siguientes variables para realizar el diseño del control de la regulación de apertura y cierre dinámico de los semáforos:

- Variable controlada (y): Número de vehículos esperando en el semáforo cuando se cambia de estado rojo a verde
- Variable de control (z): Variable resultante tras el tratamiento de la variable controlada correspondiente a un número predeterminado de ciclos consecutivos de apertura y cierre del semáforo

- Variable de mando (u): Anchura de la ventana de apertura del semáforo sobre el ciclo completo de apertura y cierre que se considera fijado
- Variable de perturbación (d): Número aleatorio de vehículos que llegan en cada ciclo de apertura y cierre al semáforo
- Variable de referencia (r): Rango de valores para el número de vehículos en cola que se considera razonable justo antes de la apertura del semáforo

En la Fig. 2 se muestra el esquema básico de control en el cual se incluye una caja de control que utiliza la diferencia entre la referencia r y la variable de control z para establecer como variable de mando u el ancho de la ventana de apertura del semáforo. En la caja correspondiente al comportamiento del cruce se toma como variables de entrada la perturbación d del número de coches que llegan aleatoriamente al cruce y la variable de mando u . En esta caja se simboliza la lógica de apertura y cierre del semáforo mediante una función de transferencia ($f(d,u)$) obteniendo como salida el número de coches en espera del ciclo siguiente. Un número de ciclos predefinido por el usuario se considera de forma conjunta para establecer la variable de control z lo cual se ha simbolizado en la Fig. 2 mediante una nueva caja entre la variable controlada y la variable de control.

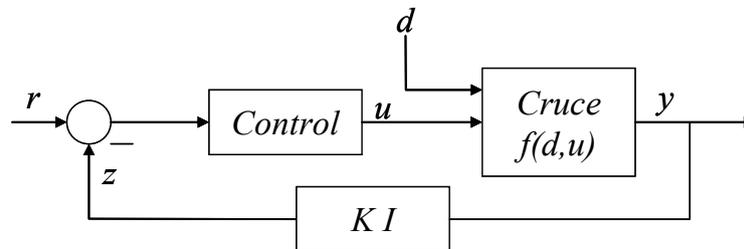


Fig. 2. Esquema básico de control del semáforo

En este estudio la lógica de funcionamiento del cruce se ha simulado con el fin de realizar los análisis oportunos que permitan evaluar la bondad de los distintos tipos de controles posibles y facilitar la mejora de su diseño.

Se ha de tener en cuenta que tanto la variable controlada es discreta y los cambios en el tiempo se producen en momentos discretos haciendo que el control incorpore un retraso inevitable en la respuesta. Con el fin de evitar los cambios frecuentes en las ventanas de apertura y cierre de los semáforos se establece un intervalo de referencia en vez de un único valor para el número de vehículos en cola. El intervalo permite que si la variable de control toma valor dentro de él, la variable de mando no altera su valor. En los tres apartados siguientes se muestran las tres filosofías de control utilizadas para establecer su diseño.

4. Control integral

El control integral evalúa como variable de control la media de los vehículos en espera para un número predefinido de ciclos. Este control se hace más lento conforme aumenta el número de ciclos promediados ya que los valores de los últimos ciclos afectarían en menor medida.

En la ecuación (1) se muestra el cálculo teórico de la variable de control z^l en la iteración n considerando un ancho de ventana de m ciclos de semáforo. Se ha de tener en cuenta que la variable de control a aplicar en el ciclo n se calcula con los m valores previos de la variable controlada. Sin embargo, en la práctica se puede actualizar recursivamente la variable de control tal y como se indica en la ecuación (2) disminuyendo el esfuerzo computacional y mejorando la rapidez de respuesta de los controles electrónicos de la regulación del semáforo.

$$z_n^1 = \frac{y_{n-1} + \dots + y_{n-m}}{m} \quad (1)$$

$$z_{n+1}^1 = z_n^1 + \frac{y_n - y_{n-m}}{m} \quad (2)$$

5. Control diferencial

El control diferencial calcula la variable de control z^2 a partir de la diferencia entre dos valores consecutivos del número de coches en espera. Dicha diferencia se considera con su signo y se promedia un total de m diferencias para evaluar la variable de control tal y como se indica en la ecuación (3). Esta variable de control suele dar lugar a respuestas más rápidas que el control integral. Sin embargo, esta variable de control se ha de utilizar conjuntamente con otra variable de control que determine el estado de congestión del semáforo ya que de por sí el valor de referencia de esta variable de control es cero.

$$z_n^2 = \frac{(y_{n-1} - y_{n-2}) + \dots + (y_{n-m} - y_{n-m-1})}{m} \quad (3)$$

Otra forma de cálculo del control diferencial consiste en restar a la suma de los vehículos en espera de los últimos m ciclos del semáforo el valor esperado de dicha suma considerando una media de vehículos en espera μ calculada a partir de un número mayor de ciclos q tal y como se indica en (4). El cálculo recursivo de este control se muestra en la ecuación (5) con el fin de disminuir notablemente el coste computacional de la variable de control.

$$z_n^2 = (y_{n-1} + \dots + y_{n-m}) - m\mu = (y_{n-1} + \dots + y_{n-m}) - m \frac{\sum_{i=1}^q y_{n-i}}{q} \quad (4)$$

$$z_{n+1}^2 = z_n^2 + (y_n - y_{n-m}) \left(1 - \frac{m}{q}\right) \quad (5)$$

6. Control combinado integral-diferencial

El control combinado integral-diferencial permite aunar las bondades de los dos controles anteriores ponderando la importancia del control integral frente al diferencial mediante los parámetros α y β en la variable z^3 . En la ecuación (6) se muestra la expresión paramétrica de esta variable combinada. En la ecuación (7) se muestra la formulación matemática recursiva de su cálculo en la cual se toman $m1$ ciclos para el cálculo del control integral y $m2$ ciclos para el cálculo del control diferencial. Se establece como premisa que el valor de $m1$ ha de ser mayor al de $m2$ para estabilizar el control. No obstante, tanto el valor de los parámetros α y β como el valor de $m1$ y $m2$ constituyen parte del diseño del control.

$$z_n^3 = \alpha z_n^1 + \beta z_n^2 \quad (6)$$

$$z_{n+1}^3 = \alpha \left[z_n^1 + \frac{y_n - y_{n-m1}}{m1} \right] + \beta \left[z_n^2 + (y_n - y_{n-m2}) \left(1 - \frac{m2}{q}\right) \right] \quad (7)$$

7. Medidas comparativas

El diseño paramétrico del control de regulación necesita establecer medidas que permitan comparar la bondad de los distintos controles. Por un lado, se requiere una medida que indique la rapidez con la actúa el control cuando se produce un cambio de comportamiento en

las entradas de vehículos al cruce. Este tipo de situaciones acontece en cambios de intensidad tráfico a lo largo del día, tanto de menor a mayor intensidad e viceversa. Por otro lado, se requiere igualmente una medida que permita evaluar las oscilaciones que tiene la variable controlada a lo largo de un número determinado de ciclos del semáforo, lo que sería equivalente a una medida del amortiguamiento obtenido por el control.

Concretamente, para evaluar la rapidez de respuesta de los controles tras una perturbación en las llegadas al semáforo se determina el ciclo del semáforo que consigue que en tres ciclos consecutivos el número de vehículos en espera se encuentre dentro del intervalo de referencia preestablecido por el usuario. Para evaluar el amortiguamiento se contabiliza el número de vehículos que se salen del intervalo de referencia a lo largo de un periodo de tiempo de funcionamiento del semáforo.

En la comparación entre los distintos controles de regulación se aplica la técnica estadística de los números aleatorios comunes. Esta técnica se implanta garantizando que para cada diseño del control de regulación se han utilizado las mismas llegadas aleatorias de coches al cruce. Aplicando los mismos números aleatorios se aumenta la precisión en la comparación de los distintos controles ya que la aleatoriedad debida a las llegadas de los vehículos disminuye ya que debiera afectar aproximadamente en la misma medida a los distintos controles. Esta técnica resulta fácil de implantar cuando es posible gestionar la asignación de diferentes cadenas de números aleatorios aplicadas a las entradas aleatorias del modelo.

8. Comparaciones realizadas

Para comparar de manera más precisa el comportamiento de los distintos controles se han modelado y fijado ciertos parámetros de diseño en el cruce de la calle José Abascal con Alonso Cano mediante la herramienta de simulación GPSS-World, Minuteman (2009):

- La comparación se ha centrado en la evolución de la cola de espera para un único carril del semáforo situado en la calle José Abascal
- El grado de intensidad de tráfico que se simula corresponde a un nivel medio. El ciclo de apertura y cierre del semáforo del cruce dura en total 84 segundos en el cual se ha prescindido del estado ámbar
- El intervalo de referencia de vehículos en cola se sitúa entre 4 y 6 vehículos (ambos valores incluidos)
- El número de ciclos del semáforo al que se aplica al control integral denominado $m1$ es de 10. En parte diferencial del control combinado se utilizan los 3 últimos ciclos de los 10 anteriores en lo que se ha denominado el parámetro $m2$ del control combinado integral diferencial.

En la parte superior de la Fig. 3 se muestra la evolución de la variable de mando para los primeros 10000 segundos utilizando el control integral y en la parte inferior de la figura se muestra la evolución de los vehículos en cola. Cuando se varía la ventana de apertura del semáforo de José Abascal, ésta se limita en cada ciclo del semáforo a un máximo del 2% tanto en sentido positivo como negativo con el fin de evitar oscilaciones excesivas.

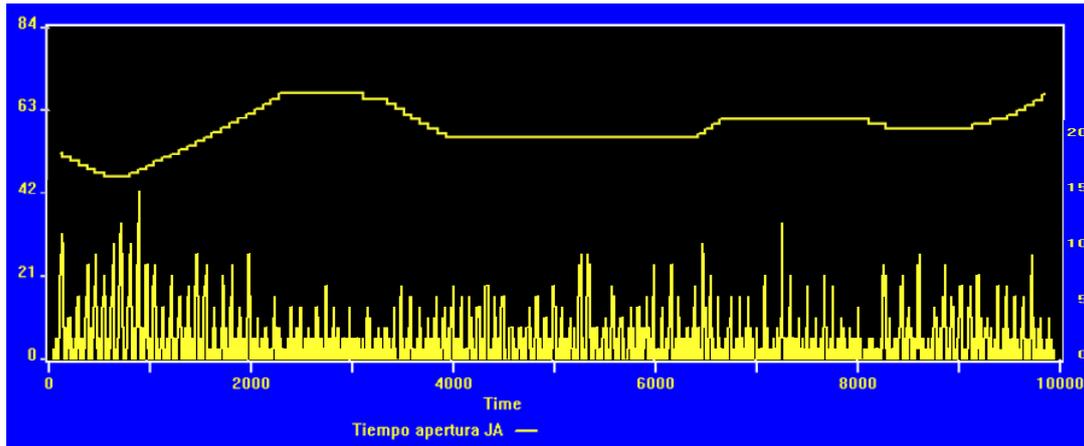


Fig. 3. Evolución de la ventana de apertura y de la cola de espera con control integral en calle José Abascal

En la Fig. 4 se muestra el histograma de la distribución de los vehículos en espera en la calle José Abascal aplicando control integral. La distribución resultante tiene una media de 5.7 vehículos y una desviación estándar de 2.8.

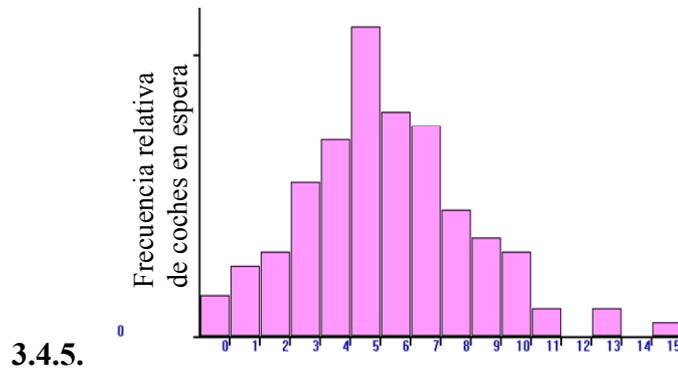


Fig. 4. Histograma de la cola en calle José Abascal aplicando control integral

En la parte superior de la Fig. 5 se muestra la evolución de la variable de mando para los primeros 10000 segundos utilizando el control integral diferencial con los parámetros $\alpha = \beta = 1$. En la parte inferior de la figura se muestra la evolución de los vehículos en cola. Cuando se varía la ventana de apertura del semáforo de José Abascal, ésta se limita en cada ciclo del semáforo a un máximo del 0.5% en ambos sentidos.

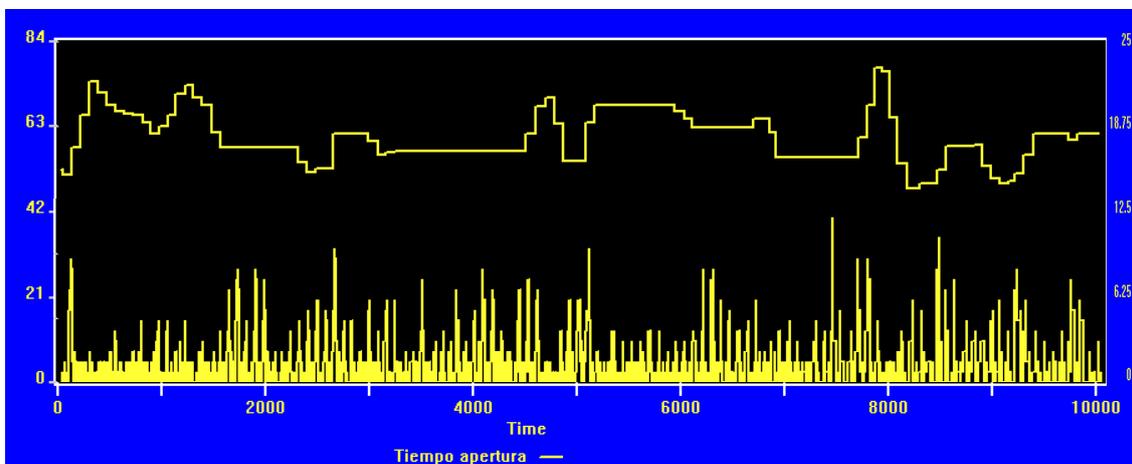


Fig. 5. Evolución de la ventana de apertura y de la cola de espera con control integral diferencial

En la Fig. 6 se muestra el histograma de la distribución de los vehículos en cola en la calle José Abascal con el control integral diferencial. La distribución posee una media de 5.3 vehículos con una desviación estándar de 3. En esta distribución de frecuencia relativa se aprecia un reparto más homogéneo del número de vehículos en cola que con el control integral.

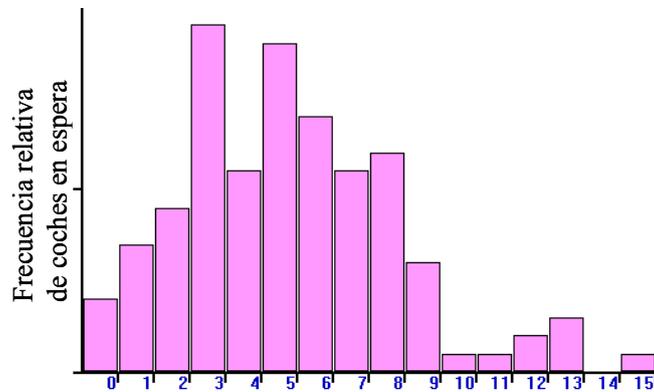


Fig. 6. Histograma de la cola en calle José Abascal aplicando control integral diferencial

En la Tabla 1 se muestran los valores de amortiguamiento y rapidez de diferentes controles de regulación. Se aprecia como el control integral tiene peor comportamiento que el resto de controles combinados ya que tiene el mayor valor de amortiguamiento y menor de rapidez. Comparando los distintos controles combinados para $\alpha = \beta = 1$ el que tiene mejor comportamiento es el que limita la variación de la apertura en cada ciclo al 0.5% en cada ciclo. Se indican también en la Tabla 1 los valores medios y desviaciones típicas del número de vehículos en espera tanto en la calle José Abascal como Alonso Cano.

Tabla 1. Comparación de medidas entre distintos diseños de control

	Integral $\Delta\% = 2$	Combinado $\Delta\% = 0.1$	Combinado $\Delta\% = 0.2$	Combinado $\Delta\% = 0.5$
Amortiguamiento	61	19	53	22
Rapidez	3	13	13	7
Media J. Abascal	5.6	4.89	5.31	5.26
Var J. Abascal	2.8	3.46	3.3	3.03
Media A. Cano	2.6	2.87	2.77	2.74
Var A. Cano	1.71	1.84	1.7	1.71

Adicionalmente al cambio porcentual del ancho de apertura se han hecho pruebas sobre otros tipos de variable de mando, así por ejemplo cambiar la duración del ciclo manteniendo el porcentaje de apertura, o bien cambiar simultáneamente la longitud de la ventana de apertura del semáforo y del ciclo. En ambos casos los malos resultados obtenidos indican que la duración del ciclo debe mantenerse o cambiarse sólo en conjunción con la del resto de semáforos cuyo tráfico se dirige a este cruce. El cambio de la duración del ciclo del semáforo de manera aislada provoca que nuevas rachas de vehículos provenientes de otros semáforos previos al cruce hagan que el control sea inestable ya que es probable que un ciclo mayor del semáforo reciba el doble de rachas que uno inferior.

9. Conclusiones

La regulación de los semáforos en función de la intensidad del tráfico que existe en cada momento requiere del diseño de controles adecuados para poder mejorar la gestión del tráfico.

Mediante el uso de cámaras con visión artificial se consigue medir el número de vehículos que están esperando justo antes de que el semáforo se ponga en verde en cada ciclo. Esta variable controlada es la que se utiliza en el control para establecer una variable de control que finalmente modifica la variable de mando que en este caso es el ancho de apertura del semáforo para el mismo tiempo de ciclo.

En este estudio se ha ajustado mediante distribuciones estadísticas el tráfico racheado en un cruce real de la ciudad de Madrid. Se han comparado distintos diseños de control integrales, diferenciales y combinados. Para determinar el mejor diseño de control se han establecido medidas de rapidez y amortiguamiento y se ha simulado el funcionamiento de dichos controles bajo las mismas condiciones de tráfico.

Agradecimientos

Mi agradecimiento sincero a los Ingenieros D. Diego Garzón Sánchez y D. Ernesto de la Rocha, cuyos proyectos fin de carrera han permitido el desarrollo de este trabajo para la obtención de su título de Ingeniero en Organización Industrial y de Ingeniero Superior en Informática.

Referencias

Barceló, J. et al (1994). AIMSUN2 and the GETRAM Simulation Environment. Internal Report. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Cataluña

De Schutter, B. (1999). Optimal Traffic Light Control for a Single Intersection. Proceedings of the American Control Conference. San Diego, California June 1999. Páginas: 2195-2199

Minuteman (2009). GPSS World Reference Manual. <http://www.minutemansoftware.com>

Onodera, K.; Nakamichi, H.; Yokota, T. (1999). Implementation and evaluation of a new traffic control center which aims to optimize traffic signal control, Intelligent Transportation Systems, Proceedings. 1999 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on 5-8 Oct. 1999 Páginas: 404 - 409

Pagola y de las Heras, F. L. (2006), Regulación automática. Publicaciones de la Universidad Pontificia Comillas