

# **Condiciones para la implantación de la regulación de intensidades en accesos en carreteras de alta capacidad y evaluación de sistemas de control**

**Rafael Jurado Piña**

Profesor Titular de Universidad (i)

**José M<sup>a</sup> Pardillo Mayora**

Profesor Titular

**Begoña Guirao Abad**

Profesor Titular

Departamento de Ing. Civil Transportes, Universidad Politécnica de Madrid, España

**Rafael Bojórquez Manzo**

Profesor Titular, Depto. de Ing. Civil y Minas, Universidad de Sonora, México

## **RESUMEN**

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los responsables de la explotación de las autopistas y redes arteriales en las zonas metropolitanas de las grandes ciudades es la congestión, tanto recurrente como no recurrente. La regulación de la intensidad en los ramales de acceso a las autopistas urbanas es reconocida como una estrategia eficaz para mejorar el funcionamiento del tráfico, reduciendo la congestión tanto en el espacio como en el tiempo en el tronco de las autopistas y evitando la propagación de la congestión a la red urbana adyacente o a otras salidas o entradas al tronco de las autopistas. La regulación se lleva a cabo a través de semáforos dispuestos en las entradas regulados mediante un controlador regido por un algoritmo de control, el cual se alimenta de datos en tiempo real de las condiciones de la circulación.

En la comunicación se sintetiza la metodología que se está aplicando en una investigación que se está realizando en el Departamento de Ingeniería Civil: Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en el que se analizan las condiciones que se deben presentar para la implantación de la regulación de intensidades en accesos en carreteras de alta capacidad, fundamentalmente relacionadas con las características del tráfico, el diseño geométrico del tronco y de los accesos y la operación del sistema. Se analizan asimismo los diferentes algoritmos de control que serán evaluados mediante microsimuladores de tráfico.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La regulación de la intensidad en los ramales de acceso a las autopistas urbanas o “ramp metering” es la forma más extendida de control de la congestión en los Estados Unidos, y más recientemente en algunos países europeos. El fundamento del proceso consiste en regular el número de vehículos que accede a la vía principal a través de los ramales de entrada con el

objetivo de que la demanda no exceda la capacidad en ninguna sección de la vía. En las entradas se disponen semáforos regulados mediante un controlador regido por un algoritmo de control que da paso a los vehículos en función de las condiciones de circulación en el tronco. Los vehículos en los ramales de entrada tienen unos tiempos de espera variables en función del nivel de congestión, mientras que en el tronco se mantiene un flujo no congestionado. Con ello se llegan a conseguir aumentos de la capacidad del orden del 20%. Otro efecto de este tipo de regulación es que las incorporaciones de los vehículos desde los ramales al tronco producen de una en una con un espaciamiento constante, lo que facilita los movimientos de trenzado y disminuye la perturbación que se genera en la corriente principal de tráfico.

## **2. ESTRATEGIAS DE REGULACIÓN**

Las estrategias de regulación del tráfico en los accesos a las vías de gran capacidad pueden ser clasificadas fundamentalmente en base a dos criterios. El primero de ellos se refiere a si el sistema opera con tiempos fijos u opera en tiempo real a partir de las mediciones en detectores de tráfico ubicados en puntos estratégicos. Un segundo criterio, que se aplica exclusivamente a los sistemas que operan a partir de mediciones de las variables del tráfico en tiempo real, se basa en regular los accesos de forma individualizada a partir de datos próximos a la incorporación, o bien de forma coordinada mediante algoritmos que tienen en cuenta simultáneamente las mediciones en una serie de incorporaciones.

Existen muchas propuestas de algoritmos teóricos para la regulación del tráfico en los accesos tanto de forma individual como coordinada a partir de mediciones del tráfico en tiempo real. Sin embargo, se tiene poca experiencia en el empleo de los mismos y en los beneficios que pueden ser obtenidos con ellos bajo diferentes escenarios. Algunos de los algoritmos más relevantes que serán empleados en la investigación en desarrollo son comentados a continuación.

### **2.1 Estrategias locales**

Mediante estas estrategias se pretende mantener una función objetivo, generalmente la intensidad del tráfico en un punto de la calzada principal, por debajo de la capacidad de la sección. Se describen brevemente las características generales de los algoritmos de control de accesos locales que mayor popularidad han alcanzado en los últimos años.

#### **a) Estrategias demanda-capacidad**

En la estrategia demanda-capacidad el detector del tronco se encuentra ubicado aguas arriba de la incorporación, y en él se registran datos tanto de la ocupación como de la intensidad. Si el valor de la ocupación registrado en un determinado instante es inferior a un valor crítico de ésta (en general aquél con el cual se alcanza la capacidad de la vía en ese punto), entonces se deja incorporar un flujo desde el acceso igual a la diferencia entre la capacidad del tronco flujo

abajo de la incorporación y la medición del flujo registrada en el instante anterior.

$$r(k) = q_{cap} - q_{detector}(k-1) \text{ si } O_{detector}(k) \leq O_{cr}$$

Un inconveniente de este algoritmo es que es necesario especificar la capacidad de la vía flujo abajo de la incorporación; además, los valores de la capacidad en una sección suelen ser sensibles a demasiados factores externos, tales como los factores atmosféricos. Este algoritmo es asimismo sensible a perturbaciones en el tráfico que son difícilmente medibles.

#### b) Estrategia basada en el algoritmo ALINEA

En este algoritmo el detector se ubica flujo abajo de la incorporación, en el lugar donde realmente se suele iniciar la congestión. A diferencia del anterior es retroalimentado, es decir, para determinar la intensidad del acceso en un determinado instante  $k$ , se tiene en cuenta la intensidad regulada en el acceso en el instante anterior  $k-1$ , y además introduce un parámetro regulador que multiplica a la diferencia existente entre la ocupación deseada y la ocupación registrada en el instante  $k-1$ .

$$r(k) = r(k-1) + K_R \left[ \hat{o} - o_{detector}(k-1) \right]$$

Frente a la estrategia anterior, tiene la ventaja de que es menos sensible a las pequeñas perturbaciones que se producen en el tráfico y que frecuentemente no pueden ser detectadas, tales como la presencia de una onda de choque corta. Además, la regulación se realiza a partir de valores deseados en la ocupación, que frecuentemente se corresponden con la ocupación crítica, la cual es bastante más estable que la capacidad del tronco frente a variaciones en los factores externos.

#### c) Otras estrategias locales

Existen dos estrategias locales derivadas de las anteriores y que serán empleadas en la investigación. La primera de ellas es una variante del algoritmo ALINEA, en el cual los detectores del tronco se ubican flujo arriba de la incorporación, como es requerido por la estrategia demanda-capacidad. Esta situación se presenta en la actualidad en muchos tramos de carretera en los cuales la disposición de los detectores no obedeció a necesidades futuras de regulación de intensidades en accesos. Otro algoritmo que será empleado es una variante de ALINEA que se emplea para tener en cuenta la existencia de cuellos de botella lejanos a las incorporaciones. Esto ocurre cuando hay una reducción en el número de carriles de la calzada, o cuando existe una reducción en la capacidad del tronco debido a otros factores, tales como la presencia de un túnel, o a cambios importantes en las características geométricas de la vía (fuertes curvaturas y/o inclinaciones de la rasante).

## **2.2. Estrategias coordinadas**

Las estrategias locales de regulación de intensidades en accesos pueden llegar a ser eficientes cuando se emplean de manera independiente en múltiples accesos, si no existen restricciones relativas a las longitudes de las colas que se puedan formar en los ramales. La existencia o no de restricciones dependerá tanto de la propia demanda de tráfico en los accesos como de las características geométricas de los ramales, tales como su longitud y su capacidad de almacenamiento. Sin embargo, existen muchas situaciones en las cuales se presentan restricciones relativas a este factor, y en estos casos las estrategias coordinadas pueden mejorar de forma significativa el funcionamiento del sistema, ya que permiten aprovechar conjuntamente las capacidades de almacenamiento de los diferentes ramales de acceso. Además, otro factor que puede mejorarse mediante el empleo de estas estrategias coordinadas es la equidad entre los diferentes accesos, es decir, es posible conseguir un mayor grado de homogeneidad en las demoras experimentadas por los usuarios de los accesos.

Existen múltiples estrategias de control coordinado, algunas de ellas de elevada complejidad, a pesar de que apenas se tiene experiencia en su aplicación en situaciones reales. Fundamentalmente en Estados Unidos han sido implementados algunos sistemas coordinados que se basan en la estrategia local demanda-capacidad. En la investigación se pretende evaluar diferentes algoritmos retroalimentados, en los cuales incluso se tendrán en cuenta las predicciones a corto plazo de la demanda. Algunas de estas estrategias se indican a continuación:

- Estrategias de control óptimo
- Estrategias de control jerarquizadas
- Estrategias basadas en reglas
- Algoritmo Zona
- Algoritmo Helper
- Algoritmo del cuello de botella
- Modificaciones de los tres algoritmos anteriores para la introducción en los mismos de estrategias de control local tipo ALINEA

## **2.3 Otros algoritmos necesarios**

Además de los algoritmos necesarios para la regulación de las intensidades en los accesos a la calzada principal, se necesitan para la implementación in situ algoritmos que estimen y controlen la longitud de las colas en los ramales a partir de una serie de detectores ubicados en los mismos, con el objeto de evitar que la propagación de las colas pueda perturbar la circulación en otras vías existentes aguas arriba del ramal.

### **3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN**

La regulación de intensidades en los accesos a las vías de gran capacidad implica que se tenga que llegar a un equilibrio entre los intereses de los usuarios que circulan por la calzada principal, que se verán beneficiados, y los que pretenden acceder al tronco desde el entramado urbano adyacente a la vía, que serán los perjudicados. Pero los beneficios de las regulaciones están condicionados generalmente a una correcta implementación y a una operación eficiente del sistema. Por ello, un aspecto fundamental para el funcionamiento óptimo del sistema es evaluar la mejor disposición de los detectores de tráfico para un determinado tramo de carretera y sus enlaces, en función de las características físicas del mismo y de la demanda de tráfico, así como la elección del algoritmo de control más adecuado.

Para la evaluación del funcionamiento de los sistemas coordinados es necesario recurrir a herramientas que permitan simular las condiciones de la circulación de una manera lo más próxima posible a la realidad, debido a su elevada complejidad y a la interacción de un elevado número de factores. En la investigación en desarrollo se están empleando modelos de simulación del tráfico tipo microscópicos. El empleo de estos tipos de simulaciones permite plantear diferentes escenarios y evaluar la eficiencia conseguida con diversos tipos de algoritmos de regulación en función de la configuración física del tramo y de las características de la demanda.

#### **3.1 Lugar de estudio**

Si bien el estudio se podría llevar a cabo planteando diferentes escenarios ficticios, se cree que su aplicación en casos reales podría permitir calibrar los modelos y además proporcionaría un valor añadido a los resultados obtenidos. Por ello se ha elegido como muestra para el análisis la ronda de circunvalación de Málaga, la autovía A-7 entre los puntos kilométricos 229 y 246, con la configuración que presentaba antes del inicio de las obras de remodelación de enlaces que en la actualidad se están llevando a cabo. A partir de los detectores existentes en diferentes puntos del tronco y de sus accesos, que registran de manera continua las condiciones de la circulación (intensidad, velocidad y ocupación), es posible caracterizar en gran medida la demanda de tráfico existente.

#### **3.2 Identificación de cuellos de botella**

Un diseño adecuado de los sistemas de regulación de intensidades en accesos requiere conocer la ubicación de los cuellos de botella, pues será preciso controlar en ellos las variables que indiquen cuándo se alcanza la capacidad en los mismos (ocupación crítica o la propia capacidad), para su empleo en los algoritmos. Las demoras suelen originarse como consecuencia de un incremento de la relación demanda/capacidad en determinados puntos de la vía, y el motivo puede ser tanto un aumento significativo de la demanda como una caída

importante de la capacidad (p.e. algún incidente que deje inhabilitado un carril). Cuando la congestión se produce de manera recurrente en un determinado punto, el motivo de ello suele ser el aumento de la demanda por encima de la capacidad en determinados intervalos horarios. Es importante localizar las secciones que constituyen los cuellos de botella y en las cuales se inicia la caída de los niveles de servicio, con propagación de las colas flujo arriba mientras la demanda supere la capacidad remanente de la vía en el cuello de botella. En el tramo elegido para la investigación se han localizado cuellos de botella asociados a los siguientes elementos:

- Zonas de trenzado (existen dos zonas de trenzado en las cuales se originan cuellos de botellas importantes, ambas en la calzada sentido Barcelona).
- Flujo elevado en determinados accesos (ocurre en varios accesos a zonas de playa y centros de ocio debido a incrementos importantes de la demanda en momentos puntuales).
- Fuerte curvatura en planta combinada con incorporaciones cercanas.
- Pérdidas de carril (ocurre en la calzada sentido Barcelona unos metros antes del enlace con la carretera MA-21 hacia el aeropuerto).
- Túneles y deslumbramiento en la entrada (en determinados momentos se ha observado que ambos factores contribuyen a que se genere un cuello de botella en la entrada al túnel del Cerrado de Calderón).
- Propagación de colas hasta el tronco por reducida capacidad en incorporaciones desde ramales de salida a otras vías (se ha observado que esto ocurre en varios enlaces, propagándose las colas hasta algunas salidas existentes en el tronco; algunos de ellos se están remodelando en la actualidad). En estos casos poco se puede mejorar la situación mediante el control de entrada en los accesos.

Para la identificación se han empleado los datos proporcionados por los detectores de tráfico ubicados en diferentes puntos del itinerario, tanto en el tronco como en los ramales. No obstante, los detectores del tronco en su mayoría no se encuentran ubicados en los cuellos de botella, y por lo tanto la información que proporcionan hay que interpretarla con cautela. En muchos casos se refiere a la situación del tráfico que ha sido generada debido a la propagación de una cola originada en una sección aguas abajo, la cual es la que realmente interesa como sección de control para su empleo en el desarrollo de los algoritmos. Por ello, en la identificación de los cuellos de botella es necesario complementar los datos de los detectores existentes con la información proporcionada por los centros de gestión del tráfico, desde los cuales se realizan observaciones continuas de las condiciones de la circulación a través de las cámaras de televisión.

### **3.3 Definición de escenarios**

La metodología de la investigación se aplicará sobre diferentes escenarios. En las primeras evaluaciones la simulación se llevará a cabo en los siguientes:

- Hora punta de la mañana para los días laborables fuera de verano, pues la vía se suele encontrar congestionada en varios puntos.
- Hora punta de la tarde en los días laborables fuera de verano.
- Hora punta de viernes y domingos de verano.

Además de las situaciones anteriores en las cuales la congestión se suele presentar de forma recurrente, se analizarán otros escenarios en los cuales se tendrá en cuenta la existencia de posibles incidentes tanto en hora punta como fuera de hora punta.

### **3.4 Evaluación**

Para evaluar la efectividad de los diferentes algoritmos de control pueden definirse diferentes medidas de evaluación del funcionamiento del sistema o bien del funcionamiento de los accesos y del tronco de manera independiente. Algunos de estos indicadores se describen a continuación:

- Vehículos-horas durante el período de la simulación. Este indicador evalúa el funcionamiento del sistema en su conjunto, es decir, teniendo en cuenta tanto los vehículos que circulan por el tronco como los vehículos que se incorporan en los accesos.
- Tiempo de viaje medio de los vehículos que circulan por el tronco. Es una medida del comportamiento de la circulación evaluada desde el punto de vista de los vehículos que circulan por la calzada principal a lo largo de todo el tramo y durante todo el proceso de simulación.
- Demora total en los accesos. Es una medida de los efectos que tienen las operaciones de regulación de intensidades sobre los vehículos que utilizan los accesos a la calzada principal de la vía.

## **4. CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO**

De entre las diversas opciones disponibles para la construcción del modelo de microsimulación se ha optado por emplear el programa TSIS/CORSIM, desarrollado para la FHWA, el cual permite el análisis del comportamiento del tráfico en distintos tipos de emplazamientos viarios, condiciones de circulación y bajo diversas actuaciones de gestión. En el entorno de este sistema la infraestructura se modela basándose en una configuración de arcos (tramos) y nodos.

Para llevar a cabo la calibración del modelo es necesario tanto el modelo de la red como la información registrada en los detectores ubicados en el tramo. Deben ser considerados aspectos tales como la proporción de vehículos pesados, características del comportamiento de los distintos tipos de vehículos (aceleraciones y deceleraciones), comportamiento de los conductores (agresividad), etc. La calibración suele consistir en un proceso iterativo en el cual

se minimice una función objetivo, que puede venir dada por la diferencia entre los conteos de tráfico en los puntos de medida reales y los proporcionados por la simulación. Otra manera de estimar la precisión de la calibración del modelo es a través de las relaciones existentes entre las variables macroscópicas del tráfico (intensidad-ocupación-velocidad) para la situación real y la simulada, en las secciones donde existen detectores.

En el tramo de autovía seleccionado para la evaluación existen en la actualidad accesos y tramos en los cuales no existen detectores de forma permanente y por lo tanto será preciso plantear diferentes escenarios en los que se consideren diferentes valores de las intensidades de tráfico en los mismos.

## **5. CONCLUSIONES**

Con la investigación en desarrollo se pretende evaluar la eficacia obtenida mediante la aplicación de diferentes algoritmos de regulación de intensidades en accesos, tanto de forma individualizada como coordinada, en una vía que se considera representativa en cuanto a su diseño y a las características de la demanda de tráfico de las grandes vías metropolitanas en España. Para ello se plantean diferentes escenarios representativos de los momentos en los cuales la congestión alcanza sus mayores niveles de una manera recurrente, además de situaciones de congestión debido a incidentes. La interpretación de los resultados obtenidos podrá asimismo proporcionar unos criterios a tener en cuenta en la implantación de la regulación de intensidades en las carreteras de gran capacidad en España.

## **REFERENCIAS**

PARDILLO, J.M. (2001): Aplicación de tecnologías ITS a la mejora de las condiciones de circulación en autopistas mediante la regulación de intensidades de acceso en períodos de congestión. II Congreso Nacional sobre Sistemas Inteligentes de Tráfico. ATC Sevilla.

PAPAGEORGIU, M. Y PAPAMICHAIL, I. (2007): Handbook of Ramp Metering. Euramp – European ramp metering project.

PAPAGEORGIU, M., HADJ-SALEM, H. AND BLOSSEVILLE, J. M. (1991) ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering. Transportation Research Record

CHU, L., LIU, H. X., RECKER, W. AND ZHANG, H. M. (2004) Performance Evaluation of Adaptive Ramp-Metering Algorithms Using Microscopic Traffic Simulation Model. Journal of Transportation Engineering

TAYLOR, C., MELDRUM, D. AND JACOBSON, L. (1998) Fuzzy Ramp Metering: Design Overview and Simulation Results. Transportation Research Record