

UN ENFOQUE MATRICIAL PARA EL MODELAMIENTO SIMPLIFICADO DE SITUACIONES
DE TRANSITO EN AMBITO LOCAL

Juan Escudero O.
Depto. Ingeniería Industrial
Universidad de Chile

Roberto Riveros K.
Depto. Ingeniería Industrial
Universidad de Chile

R E S U M E N

Los problemas de tránsito en ámbito local se caracterizan por situaciones puntuales de congestión, causadas por un número limitado de flujos vehiculares, a las cuales es necesario dar solución mediante medidas de gestión de tránsito o pequeñas obras de infraestructura.

El estado del arte en este campo es el uso de herramientas tales como TRANSYT8 o TRAFFIQ, que permiten simular el comportamiento con notable precisión y detalle, aunque con un costo relativamente elevado en términos del tiempo profesional dedicado a expresar el problema en el formato preestablecido.

El método simplificado que aquí se plantea se basa en el concepto de matriz de conectividad, el cual puede ser implementado fácilmente y en cuestión de minutos, utilizando paquetes de cuarta generación en microcomputador tales como VISICALC. Si bien este método sacrifica parte del detalle operativo que ofrecen las alternativas antes citadas, presenta una gran flexibilidad para introducir cambios en la configuración de la situación de tránsito y obtener los indicadores de eficiencia correspondiente en forma interactiva. Por lo tanto esta herramienta presenta ventajas significativas para la fase de preselección de alternativas de diseño y evaluación preliminar.

- 1.- Caracterización de problemas de tránsito de ámbito local. Una gran proporción de las situaciones conflictivas o deficitarias en una red vial, pueden ser consideradas como estrangulamientos locales de la capacidad de una vía o de un conjunto de vías convergentes. En tales situaciones, el estrangulamiento local impide el pleno uso de la capacidad disponible en el resto de la o las vías comprometidas; por lo tanto puede ser considerado como un obstáculo cuya remoción a un costo moderado permite eliminar demoras sin cambiar estructuralmente los flujos.

Ejemplos típicos de estas situaciones son: (i) intersecciones semaforizadas de dos vías principales que mantienen su sección corriente en su paso por la intersección; (ii) intersecciones menores no semaforizada en vías de alta velocidad; (iii) rotondas de entrecruzamiento entre varias vías convergentes.

El primer problema que se presenta en todos estos casos es una capacidad de paso reducida de las líneas de parada, a un nivel más bajo que la de las vías de acceso. Esto implica la formación de colas, con la correspondiente demora.

El segundo problema, característico en intersecciones complejas y más en particular de las pistas, cuando los largos de cola superan la capacidad de almacenamiento.

El tercer problema se presenta en la programación de los semáforos y su coordinación con los de otras intersecciones relacionadas. Un estrangulamiento en la capacidad en una intersección corrientemente implica la necesidad de recurrir a ciclos más largos para todos los semáforos interrelacionados. Esto obliga a la consideración explícita de un ámbito más amplio que la intersección misma. Además, situaciones de tránsito muy exigidas y complejas implican programaciones de semáforos también

complejas, lo cual puede complicar la coordinación entre los semáforos relacionados.

- 2.- Soluciones típicas a los problemas de estrangulamiento local. Los déficits de capacidad que originan los problemas de demora pueden ser solucionados por tres tipos de medidas principales. En primer lugar, los déficits de capacidad en una línea de parada pueden ser superados mediante medidas operativas, tales como la prohibición de giros en la intersección misma, con su correspondiente desvío o trayectorias más largas. En segundo lugar, la capacidad puede ser aumentada mediante ensanches locales que aumenten el número de pistas en las líneas de parada más exigidas. Una variante de este tipo de medidas es la habilitación o prolongación de pistas especiales de giro. La tercera familia de soluciones es la desnivelación de el o los flujos más conflictivos, liberando el espacio en superficie para los restantes flujos. La experiencia recogida en Santiago en el análisis de alrededor de 30 situaciones de este tipo, muestra consistentemente que, cuando se justifica una desnivelación, esta se refiere al flujo mayoritario de paso.

Una cuarta familia de soluciones menos estructurada que las anteriores, se refiere a las rotondas. Este recurso de diseño vial puede ser usado con ventaja para permitir entrecruzamiento no semaforizado de flujos débiles. Por otra parte, cuando aumentan los flujos convergentes a una rotonda existente, la eficiencia de ésta baja rápidamente y se plantean las alternativas de ampliar sus accesos, otorgar preferencias explícita a los flujos principales, regular los accesos con semáforos o superponer un paso desnivelado.

La base conceptual en que se basa el modelamiento de las situaciones antes descritas, con vistas a la evaluación de las soluciones correspondientes, es el supuesto de que cualquiera de las soluciones va a dejar inalterado la estructura de orígenes y destinos de los flujos vehiculares que utilizan el sistema bajo estudio. Por lo tanto, todos los efec

tos relevantes se producirán por cambio en las demoras o en las trayectorias de un conjunto dado de flujos que entran y salen del sistema a través de estaciones fijas.

Las estaciones de entrada y salida estarán conectadas por una red de arcos, los cuales se entrecruzan en una serie de nodos internos. Los arcos tendrán longitudes, capacidades (número de pistas) y velocidades (tiempo de paso) características. Los nodos tendrán capacidades (ancho) en cada línea de parada concurrente, la cual será expresada como una función de los flujos de cada una y su respectiva composición.

Las tres familias de soluciones posibles antes descritas pueden ser incorporadas a este esquema conceptual con distintos grados de dificultad. Los cambios operativos afectarán a las solicitudes de los distintos arcos y nodos de la red interna. Los cambios en la geometría de superficie en general podrán ser expresados como modificaciones en las funciones de capacidad de los nodos y sólo ocasionalmente habrá que modificar la definición de los arcos. En cambio las desnivelaciones y otros cambios estructurales menores tales como la creación o eliminación de rotondas implicarán una modificación de la red, a la cual será necesario añadir o restar arcos y modificar las reglas de conexión, distancias y velocidades.

- 3.- Modelamiento de los flujos mediante matrices de conectividad. El concepto elemental de matriz de conectividad proviene de la expresión matemática de un grafo. Si se define un grafo $g = (V, T)$, donde V es el conjunto de vértices y T es el conjunto de arcos, asociado a este grafo podrá ser definida una matriz de conexiones $K = (k_{i,j})$ donde

$$k_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i,j) \in T \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases}$$

Esta matriz permite representar en forma fácil y rápida la geometría de una red vial, donde cada arco corresponde a un segmento de vía y los nodos corresponden a intersecciones entre ellas. Para especificar los flujos en este grafo será necesario definir tres tipos de nodos: entradas (e), salidas (s) y nodos funcionales. Los flujos f_{ij} en los arcos T deben cumplir con las siguientes condiciones para ser factible:

$$f(i, V) - f(V, i) = \begin{cases} f_{s,e} & \text{si } i \in e \\ 0 & \text{si } i \notin s \\ f_{e,s} & \text{si } i \in s \end{cases}$$

$$c(i,j) \geq f(i,j) \geq 0$$

donde: i es un nodo cualquiera

V es un nodo específico en el cual deben cumplirse estas relaciones

$f_{s,e}$ es el flujo que entra a través de V

$f_{e,s}$ es el flujo que sale a través de V

$c(i,j)$ es la capacidad del arco (i,j)

La estructura de un problema, por lo tanto, queda expresada por la matriz $f(i,j)$ (correspondiente a la matriz K pesada por los flujos de cada arco) más un sistema de ecuaciones que representa el balance de masas en cada nodo.

Esta forma matemática de expresar el problema es incómoda de manejar, por lo cual se recurre al concepto de conjunto ruta s-t que corresponde al sub-conjunto de arcos que son utilizados por una trayectoria entre un origen y un destino determinado. En un grafo donde existen trayectorias únicas entre cada entrada y cada salida es posible definir una matriz de rutas únicas, formada por todas las rutas posibles entre pares de nodos.

Utilizando este concepto, la estructura de un problema podría ser descrita por la matriz de rutas y la matriz de flujos de entradas a salidas, entre ambas matrices existe una relación biúnica ya que a cada par O/D corresponde sólo una ruta.

Todo esto puede ser representado bidimensionalmente, adoptando una dimensión (v) para los pares O/D y la otra para los arcos del conjunto T . En esta representación a cada uno de los arcos de una ruta corresponderá un coeficiente distinto de 0. El término típico

$$l_{v,h} = \begin{cases} 1 & \text{si } h \in v \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases}$$

De igual forma, la matriz de flujos O/D puede ser reescrita como un vector F_v . El producto $F \times L$ será una nueva matriz en la cual el término típico será $f_{v,h}$ que representa el aporte del flujo v al flujo total del arco h . Por lo tanto el flujo total del arco h será $f_{\cdot,h} = \sum_v f_{v,h}$.

Una representación más cercana de los problemas de tránsito puede ser alcanzada mediante el concepto de grafo con ganancia. Dependiendo del tipo de movimiento que efectúe un flujo al atravesar una línea de parada (directo, giro derecha, o giro izquierda) los vehículos correspondientes tendrán un distinto poder congestionante o "equivalencia". Esto puede ser representado en la definición de la matriz L , donde el término típico será:

$$\bar{l}_{v,h} = \begin{cases} CE & \text{si } h \in v \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases}$$

y CE : coeficiente empírico de equivalencia, igual a uno para movimientos directos y mayor que uno para giros.

de este modo, los flujos $\bar{f}_{v,h}$ y $f_{.,h}$ quedarán expresados en vehículos equivalentes en lugar de vehículos naturales.

Por otra parte a cada arco es posible asociarle diferentes parámetros que identifiquen los atributos específicos del mismo.

Finalmente se define una matriz W_{ij} cuya peculiaridad es la siguiente

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si arco } j \text{ incide en línea de parada } i \\ 0 & \text{si arco } j \text{ no incide en línea de parada } i. \end{cases}$$

El flujo total en la línea de parada es el producto punto del vector de flujos por arco.

- 4.- Obtención de indicadores de eficiencia. Los costos de operación del sistema podrán ser expresados como una función de los vehículos-km recorridos en sus arcos y las horas-vehículo en el sistema, las cuales a su vez pueden ser descompuestas en horas-marcha y horas-espera.

Los vehículos-km en los arcos pueden ser obtenidos directamente por multiplicación de las longitudes de los arcos d_h por el flujo correspondiente $f_{.,h}$ donde los flujos deben ser expresados en vehículos naturales.

Las horas-vehículo en marcha podrán ser expresadas como:

$$TM_h = f_{.,h} \times d_h / S_h(\bar{f}_{.,h})$$

donde: $S_h(\bar{f}_{.,h})$ es la velocidad del arco, expresada como una función de su flujo medido en vehículos equivalentes.

Para estimar las demoras por detención, en primer lugar es necesario especificar líneas de parada (p) funciones de capacidad C_p para cada una de ellas. Para cada línea de parada existirá un conjunto de arcos concurrentes, de modo que su flujo total será:

$$\bar{f}_p = \sum_{h \in p} \bar{f}_{.,h}$$

En segundo lugar, es necesario especificar intersecciones. Un problema simple puede ser generalmente representado por una sola intersección. En problemas complejos será necesario estudiar varias intersecciones parciales (q) individualmente, para luego examinar sus interrelaciones. Para cada intersección parcial q habrá un subconjunto de líneas de parada concurrentes $p \in q$.

Para estimar las demoras en cada intersección parcial será necesario especificar las reglas de acceso. Las más relevantes serán: (i) accesos no semaforizados con entrada preferencial especificada y (ii) accesos semaforizados.

En general para estimar las demoras en accesos no semaforizados se utiliza el método de transformación de coordenadas con parámetros $C = 1$ y $L_0 = 0$. En este caso la capacidad de la intersección se estima suponiendo llegadas aleatorias en la corriente principal. Se considera adecuado en el modelo de capacidad, que es función de $(l^{-k}q)$, afectar dicho término por un coeficiente que considere el efecto de distribuciones de gaps bimodales.

Para estimar los indicadores de eficiencia en intersecciones semaforizadas

1. q = flujo vía principal
 t = Brecha de Aceptación

se utiliza el método convencional, cuyo input es el vector de flujos por línea de parada.

En el caso de las rotondas cada intersección se considera separadamente.

- 5.- Modificación interactiva del diseño. El planteamiento matricial antes descrito puede ser fácil y directamente expresado en términos de paquetes computacionales interactivos del tipo matriz electrónica, tales como VISICALC, MULTIPLAN, SUPERCALC o similares.

En los mencionados lenguajes, la matriz de cortes queda directamente expresada en la pantalla, con la fórmula de cálculo $f_{v,k} = f_{v,.} \times l_{vh}$ implícita en la cuadrícula correspondiente y el valor del flujo a la vista. De este modo, cualquier cambio en uno o más flujos afecta interactivamente a el o los $f_{v,h}$ correspondientes, así como los flujos totales por arco y los indicadores de eficiencia.

Un cambio en las reglas operativas tales como una prohibición de giro, implican la necesidad de cambiar la especificación del corte correspondiente a ese movimiento. Esto es realizado mediante inspección sucesiva de los casilleros de línea correspondiente, preguntando si la nueva ruta utiliza ese arco y, si lo hace, si el movimiento es directo, de giro a la derecha o giro a la izquierda.

Un ensanche local en una línea de parada es aún más fácilmente manejable. La capacidad de la línea será función o del ancho en metros o del número de pistas, dependiendo de la técnica de modelamiento adoptada. El parámetro geométrico elegido puede ser dejado explícito fuera de la fórmula. Dentro de ella, ese parámetro aparece como "el valor que se encuentra en el casillero xx". Por lo tanto, al cambiar el valor, cambia interactivamente la estimación de capacidad y todos los indicadores de eficiencia que de ella dependen.

Otras modificaciones geométricas tales como cambios en las longitudes o velocidades libres de los arcos pueden ser tratados del mismo modo.

Una modificación estructural en la geometría, tal como la desnivelación de un flujo, implican cambios más complejos en el modelo, pero todavía fácilmente manejables. En primer lugar, será necesario intercalar la columna correspondiente al nuevo arco y, eventualmente, eliminar la o las columnas correspondientes a arcos que desaparecen. En segundo lugar, será necesario revisar la definición de los subconjuntos de arcos que participan en cada línea de parada, así como la lista de líneas de parada que participan en cada intersección parcial. En tercer lugar, será necesario revisar cada corte, verificando los cambios que puedan producirse en las trayectorias de los distintos flujos.

De esta descripción se desprende que este enfoque se adapta muy especialmente al análisis de cambios de detalle en el diseño geométrico, así como a la parametrización de las solicitudes para examinar la eficiencia de su funcionamiento ante demanda cambiante. Otra aplicación interesante se refiere al análisis comparado del funcionamiento ante reglas de operación alternativas, tales como prohibiciones de giro, colocación (o eliminación) de semáforos o cambio en las reglas de prioridad.

REFERENCIAS

1. Traffic Queues and Delays at Road Junctions. TRRL Laboratory Report 909, by R.R. Kimber and Erica M. Hollis, 1979.
2. Metodología para la Evaluación Social de los Proyectos de Inversión en Vialidad Urbana. SECTU, 1982.