
ESTIMACION DE DEMORAS EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS EN PERIODOS PUNTA

Jaime Gibson

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago. Tel.: 671 0328. Fax: 671 2799

RESUMEN

Los métodos usuales para estimar demoras en intersecciones semaforizadas se basan en un período de cierta duración, en el cual se supone que el flujo y la capacidad son constantes en promedio, sólo sujetos a fluctuaciones aleatorias. Este supuesto es razonablemente realista, salvo en las horas punta, en que se puede dar una variación sistemática de la demora incluso en corto tiempo. Otro supuesto fundamental de la estimación es que cada período se inicia sin cola remanente del anterior, lo que también puede ser violado cuando hay saturación (horas punta).

Investigaciones recientes han probado que en presencia de demanda variable y alto grado de saturación, las fórmulas en uso subestiman sustancialmente la demora media. Akcelik y Roupail propusieron un método que permite considerar demanda variable y usar la misma fórmula, basado en referirse a un subperíodo de mayor flujo que el promedio. En este trabajo se discuten las limitaciones de este método y se desarrolla uno más integral, que incorpora las relaciones entre estimación de demoras, periodización y programación de semáforos teniendo en cuenta la existencia de múltiples movimientos y varias intersecciones.

Se presenta una nueva fórmula para estimar demoras con demanda variable, identificando las condiciones en que corresponde aplicarla. Además, se sugieren modificaciones al método de periodización para asegurar la validez de la estimación independiente de demoras por período, con demanda variable en aquellos con alto grado de saturación. Finalmente, se entregan recomendaciones para la programación de semáforos, aislados y en red, en períodos punta que son aplicables con los programas computacionales existentes. No obstante, para estimar correctamente las demoras para fines de evaluación será necesario introducir la nueva fórmula en los programas.



1. INTRODUCCION

El desarrollo de métodos de estimación de demoras en intersecciones que introducen dependencia del tiempo y admiten sobrecarga por lapsos limitados, constituyó un gran avance para abordar en mejor forma los problemas de congestión. Las fórmulas de Akcelik (1981) y Kimber y Hollis (1979), ambas basadas en una idea original de Whiting para tratar colas estocásticas y dependientes del tiempo, son las más empleadas por estar incorporadas en los programas computacionales más difundidos. Tratándose de intersecciones semaforizadas que operan con planes prefijados, en general se aplican a un cierto período, dentro del cual se supone que flujos y capacidades permanecen estables en promedio aunque sujetos a fluctuaciones aleatorias.

En los últimos años, varios autores advirtieron que dichas fórmulas así aplicadas podían conducir a severas subestimaciones de la demora en periodos punta con alto grado de saturación, en los que el flujo muestre una variación significativa dentro del período, por corto que éste sea. Brilon y Wu (1989) hacen un detallado análisis de la situación frente a perfiles de demanda variables, mediante cadenas de Markov. Muestran que si bien la subestimación puede ser tan alta como un 50% o más, ella se debe completamente a la no consideración de la variación sistemática del flujo dentro del período. Esto es muy importante pues revela que, pese a su carácter heurístico, la transformación de Whiting funciona con gran precisión y alienta a buscar una solución para el caso de demanda variable que mantenga las demás características de las fórmulas en boga. Brilon y Wu proponen una nueva expresión, similar a las anteriores, introduciendo una aproximación al perfil de demanda con funciones parabólicas, coseno o triangular simétrica.

Akcelik y Roupail (1993) retoman el punto con similar aproximación al perfil de demanda pero discretizada con un función escalón. Así el período queda dividido en tres partes. La central es el subperíodo propiamente punta y las otras dos, con igual nivel de flujo promedio, tienen una demanda menor. La ventaja de la discretización es que al interior de cada subperíodo se restituye el supuesto tradicional de constancia del flujo promedio. Es decir, en este enfoque la solución es vía refinamiento de la periodización en las horas punta. Akcelik y Roupail sostienen que se puede obtener una buena estimación de la demora en el período total con la fórmula en uso aplicándola eso sí al subperíodo punta y no a las condiciones promedio del período total. Más allá de esta proposición, es interesante el reconocimiento explícito de una vinculación entre la consideración de demanda variable para estimar demoras y la periodización.

Sin embargo, Akcelik y Roupail se limitan a analizar el período conflictivo, ignorando las consecuencias de su tratamiento para el período posterior, y su recomendación para elegir la posición y duración del período punta es clara para un solo movimiento pero no para el conjunto de movimientos (críticos) de una intersección. Estos son aspectos de especial relevancia en nuestro país, donde se usan métodos formales de periodización en programación de semáforos y evaluación de proyectos viales (Hadjes y Gibson, 1990; SECTU, 1988).

En este trabajo se propone un método para el tratamiento de demanda variable en forma consistente en cuanto a estimación de demandas, periodización y programación de semáforos, que se basa en la aproximación discreta de Akcelik y Roupail. En el capítulo 2 se presenta el modelo planteado por estos autores y una discusión de sus limitaciones. El capítulo 3 contiene las extensiones realizadas al



modelo, incluyendo las implicancias en periodización y programación de semáforos. Asimismo, se plantean recomendaciones acerca de cuándo aplicar un modelo de demanda variable. El trabajo concluye con unos comentarios sobre su alcance.

2. MODELO DE FLUJO VARIABLE

2.1. EL PROBLEMA

Es ya tradicional distinguir variabilidad sistemática y aleatoria en los patrones de flujo. En principio, la primera da origen a la diferenciación de períodos, lo que explica el supuesto de constancia del flujo promedio al interior de cada uno de ellos. No obstante, se suele imponer a los períodos una duración mínima (típicamente, 1 hora) por razones prácticas de variada naturaleza. Si hay un patrón de variación sistemática dentro de ese módulo mínimo, o en períodos consecutivos cuya diferenciación es rigidizada por el mínimo, la periodización no dará cuenta de él. Cuando tal variación está acompañada de un grado de saturación alto, ignorarla lleva a subestimar la demanda. Estas dos condiciones se suelen dar en los denominados períodos punta: el problema de subestimación es sólo importante en ellos.

Admitir un patrón de flujo variable dentro de un período no presenta en sí mismo una dificultad mayor. Ella aparece en la estimación de demoras, sobre todo en el caso de intersecciones semaforizadas, cuya operación cíclica significa un patrón de capacidad con variación discreta que sería complicado superponer con el flujo como variable continua. Por ello, se adopta la aproximación por una función escalón.

Si se reconoce que el flujo se modifica significativamente dentro de un período incluso breve, parecería lógico que también lo haga la capacidad. Tratándose de intersecciones semaforizadas con planes prefijados, que están frecuentemente en red, cambios constantes de plan no son recomendables o, según la tecnología de controladores, no siempre factibles por restricción al número de planes. Se supondrá entonces que durante todo el período se aplica un mismo plan y, consecuentemente, la capacidad es en promedio constante.

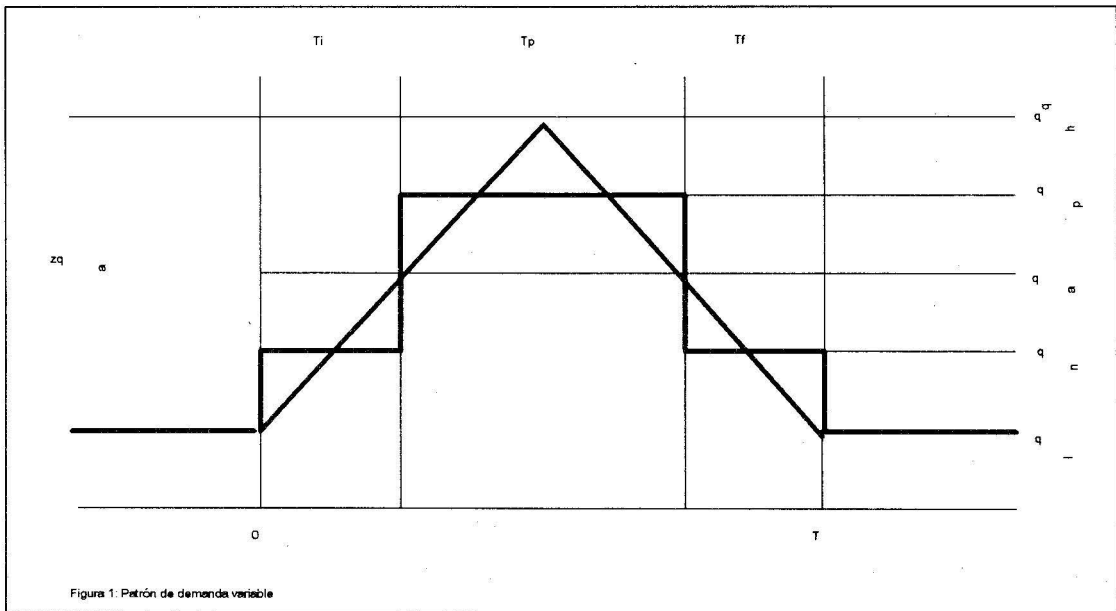
La forma en que varía el flujo de un cierto movimiento en el muy corto plazo no tiene por qué ser una constante universal, cabe que existan patrones diversos. Empero, es un dato difícil de obtener con precisión en situaciones congestionadas, más aun si hay poca distancia entre intersecciones. Ante este panorama, parece razonable adoptar un patrón genérico que recoja lo sustancial del fenómeno y buscar algún indicador que permita advertir cuándo los datos no se le ajustan bien. Se ha elegido como patrón una triangular simétrica, aproximada por una función escalón, por su flexibilidad y por su capacidad de representar concentraciones agudas como las que suelen ocurrir en la punta de la mañana. El elemento principal a controlar en relación con la calidad del ajuste es la simetría.

2.2. EL MODELO BASICO

Supóngase que en un cierto período de duración T , el flujo de un cierto movimiento varía según una triangular simétrica, aproximada por una función escalón (ver Fig. 1). La presentación del modelo y la notación siguen, casi exactamente, a Akcelik y Rouphail (1993). El período original se subdivide en tres. El inicial, de duración T_i , y el final, de duración T_f , tienen el mismo nivel de flujo q_n ; el central, de duración T_p , tiene un flujo $q_p > q_n$. El flujo promedio del período completo q_a es el promedio entre q_p y q_n . Un parámetro clave es la intensidad de la punta z , dada por:

$$z = \frac{q_h - q_l}{q_a} = 2\left(1 - \frac{q_l}{q_a}\right) \quad (1)$$

donde q_h y q_l son los flujos máximo y mínimo del período, como lo muestra la Fig. 1.



En este modelo se cumple que:

$$q_p = (1 + z/4) q_a \quad (2)$$

$$q_n = (1 - z/4) q_a \quad (3)$$

$$T_p = T/2 \quad (4)$$

$$T_i = T_f = T/4. \quad (5)$$

Luego, conociendo T , q_a y q_l queda completamente especificado. Esto supone conocer el patrón de flujos, como es obvio, y la duración del período, que no lo es tanto y sobre lo que se volverá más adelante.

Recordando el supuesto de una capacidad Q constante durante todo el período, es fácil apreciar el error que se comete al asumir un flujo promedio constante. La demora es una función fuertemente convexa por lo que el promedio de su valor en cada subperíodo será mayor que el valor calculado con el flujo promedio. A este se añade que el subperíodo punta (T_p) puede estar sobresaturado, lo que afectará también al subperíodo final, aunque $q_a < Q$.

Reconociendo que la demora media puede ser diferente para los vehículos llegados en cada subperíodo:

$$d = \frac{d_i q_n T_i + d_p q_p T_p + d_f q_n T_f}{q_a T} \quad (6)$$

donde d es la demora media para los vehículos llegados en el período total y d_i, d_p y d_f para los llegados, respectivamente, en los superperíodos inicial, punta y final.

A primera vista, en cada uno de estos subperíodos se dan las condiciones típicas de estabilidad supuestas por las fórmulas en uso por lo que podrían calcularse con ellas d_i, d_p y d_f y obtener d con la ec. (6). Dichas fórmulas contienen una componente uniforme d_u y una excedente d_N , dadas por (Akcelik, 1988):

$$\begin{aligned} d_u &= \frac{c(1-u)^2}{2(1-ux)}, \quad \text{six} \leq 1 \\ &= 0,5c(1-u), \quad \text{six} > 1 \end{aligned} \quad (7)$$

donde c es el tiempo de ciclo, u la razón de verde efectivo y x el grado de saturación del movimiento, y

$$\begin{aligned} d_N &= \frac{T}{4} \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8k(x-x_o)}{QT}} \right], \quad \text{six} > x_o \\ d_N &= 0, \quad \text{six} \leq x_o \end{aligned} \quad (8)$$

donde T es la duración del período en que se mantiene el grado de saturación, k y x_o son parámetros que varían entre autores en razón de la expresión que emplean para la cola excedente en estado estacionario. La recomendación reciente de Akcelik y Roupail es $x_o = 0,5$ y $k = 1,22(sv_e)^{-0,22}$, donde s es el flujo de saturación (veh/s) y v_e el tiempo de verde efectivo para el movimiento (s).

La fórmula para la componente uniforme supone llegadas aleatorias y un solo período de verde continuo en el ciclo. En otro caso, se modifica o se obtiene por simulación, como en el caso de redes.

Bajo nuestro supuesto de que la programación del semáforo no cambia en un período, la demora media en cada subperíodo j sólo variará en función de x_j y T_j . Si el subperíodo punta no está saturado ($x_p \leq 1$), es evidente que:

$$d_i = d_f = d_u(x_n) + d_N(x_n, T/4) \quad (9a)$$

$$d_p = d_u(x_p) + d_N(x_p, T/2). \quad (9b)$$

Pero si $x_p > 1$, la cola acumulada durante ese subperíodo deberá descargarse en el siguiente y los vehículos llegados en éste habrán de esperar que termine esa descarga para empezar a salir, con el consiguiente efecto en su demora. Esto hace necesario diferenciar dentro de T_f el período de descarga, que estará saturado. Su duración T_D está dada por:

$$T_D = \frac{x_p - 1}{1 - x_n} \frac{T}{2}. \quad (10)$$

Akcelik y Roupail demuestran que aceptando una aproximación para la componente aleatoria de la demora, la demora media para los vehículos llegados en el tiempo de descarga es igual a la de los llegados en el subperíodo punta (d_p). Para los que llegan en lo que resta del subperíodo final ($T_f - T_D$), con similar aproximación sobre su componente aleatoria, la demora media es igual a la de los llegados en el subperíodo inicial. Entonces, para $x_p > 1$:

$$d_i = d_{f''} = d_u(x_n) + d_N(x_n, T/4) \quad (11a)$$

$$d_p = d_{f'} = d_u(x_n) + d_N(x_p, T/2) \quad (11b)$$

$$T_{f'} = T_D \quad (11c)$$



$$T_f' = T_f - T_D. \quad (11d)$$

De este modo se puede estimar con la ec. (6) la demora media en el período total. Akcelik y Roupail extienden el modelo para el caso en que $T_D > T_f$, sólo para calcular la demora de los vehículos llegados en T , y para cuando $x_n > 1$, pero suponiendo que al comienzo de T_i no hay cola acumulada.

2.3. DISCUSION

El mérito del planteamiento de Akcelik y Roupail radica en proveer una solución a la incorporación de un perfil de flujo variable al interior de un período sin modificar las fórmulas ya establecidas para la estimación de demoras. En rigor, se requiere aplicarlas dos veces (para d_i y d_p) y luego combinarlas con la ec.(6). En su artículo muestran que así se obtiene un resultado muy cercano al que arrojan métodos muchos más sofisticados, como el de cadenas Markovianas de Brilon y Wu. Por otra parte, muestran también que la aproximación por una función escalón no genera distorsión apreciable en la demanda acumulada, con respecto a la función continua subyacente.

No obstante, parece inconsistente este empeño por salvaguardar la aplicabilidad de las fórmulas preexistentes con las extensiones para considerar sobresaturación remanente al final del período o que aparece nada más comenzar el período. Aun en estas extensiones, se continúa suponiendo que en el instante inicial del período no hay cola remanente del período previo. Entonces ¿para qué admitir que un período finalice antes de que se disipe la cola acumulada? ¿cómo se tratará el período siguiente? Esto es menos comprensible si se considera además que el término de un período está normalmente asociado a un cambio de programa del semáforo, lo que es de dudosa conveniencia en medio de un proceso de disipación de cola. Y si éste se prolonga más allá de T_f es muy probable que represente un fenómeno de congestión que se habrá extendido al área circundante, comprometiendo a varias intersecciones. La más probable explicación de esta inconsistencia es el difundido hábito de predeterminedar la duración de los períodos punta (por ej. 1 hora) en vez de definirla en función de las condiciones de tráfico, como se hace en el método que se usa en Chile.

El segundo aspecto discutible es la recomendación de adoptar d_p simplemente como estimador de la demora media de los vehículos llegados en todo el período. Este procedimiento sobreestima el valor de d con respecto al que entrega la ec.(6). Su justificación descansa en dos argumentos. El primero, empírico, es la notable coincidencia en la predicción con el modelo propuesto por Brilon y Wu, que a su vez se ajusta muy bien a los resultados obtenidos con las cadenas de Markov. El segundo es que así el cálculo de demoras con demanda variable continuaría implicando la aplicación de la misma fórmula y una sola vez, eso sí que con los datos del subperíodo punta en sustitución de los del período completo.

El primer argumento es interesante aunque sólo se apoye en un ejemplo. La cuestión que plantea es por qué la ec.(6) subestima la demora en el período total. La explicación de Akcelik y Roupail es que podría deberse a efectos de transición no considerados en la componente aleatoria de la demora,



que varía entre subperíodos, a lo que podría agregarse los supuestos sobre dicha componente que se hacen para simplificar el caso en que $x_p > I$. Sin embargo, no es evidente que estos factores conduzcan siempre a una subestimación y podría ser que en otros ejemplos el resultado fuera distinto. Esto necesita mayor investigación.

El segundo argumento tiene el atractivo de la simplicidad pero sólo si se piensa en un movimiento. A una intersección concurren varios movimientos y no necesariamente su variación temporal coincidirá. No parece practicable una estimación de demoras para una intersección con un programa computacional, como se hace cotidianamente, en que exista libertad para elegir el subperíodo punta de cada movimiento. Deberá usarse un período común y el problema es ajustar el perfil genérico a cada movimiento en ese mismo período. Probablemente, el ajuste será mejor para unos que para otros. En este sentido, el uso sólo del subperíodo punta, que tiene mayor sensibilidad por ser más alto el grado de saturación, puede conducir a errores mayores en la estimación. Más serio es el problema con una red con varias intersecciones.

Desde esta perspectiva, resulta discutible también la recomendación de elegir la duración del subperíodo punta a partir de la intersección del perfil de flujo y el nivel promedio en todo el período. El procedimiento puede ser válido para cada movimiento en particular pero conducir a períodos no idénticos para los movimientos críticos de una o más intersecciones. ¿Qué hacer en ese caso? No se dice nada en el artículo.

En suma, es necesario revisar estos asuntos desde un punto de vista más amplio que el de un movimiento. Nótese que ellos no afectan a la esencia de la solución propuesta por Akcelik y Rouphail sino a definiciones o procedimientos complementarios, sobre todo en lo que concierne a sus consecuencias sobre actividades relacionadas con la estimación de demoras, como son la periodización y la programación de semáforos. En el capítulo que sigue se propone un método más integrado.

3. EL METODO EXTENDIDO

3.1. DEMANDA VARIABLE Y PERIODIZACION

No sólo es usual hasta ahora estimar demoras suponiendo demanda en promedio constante dentro de un período. Otro supuesto clave, casi siempre implícito, es que se pueden estimar independientemente para cada período. Como muestra el análisis del capítulo anterior, esto sólo es válido en la medida que cada período se inicie sin una cola remanente de tipo determinístico. Más allá de que esto sea indispensable para los métodos de que disponemos, es intuitivamente acertado afirmar que un período punta termina cuando se dispó la saturación creada en él, no antes.

Surge así un criterio objetivo para determinar la duración de un período punta: al menos, la necesaria para no dejar cola determinística remanente. Asumiendo el modelo de demanda variable dentro del período ya expuesto, ello se traduce en la condición $T_D \leq T_f$, lo que implica:



$$\frac{x_p - 1}{1 - x_n} \frac{T}{2} \leq \frac{T}{4}. \quad (12)$$

Reemplazando x_p y x_n a partir de las ecs.(2) y (3) y reordenando, queda:

$$z \leq 12 \frac{1 - x}{x}. \quad (13)$$

Esta condición debe, lógicamente, acompañarse de $x < 1$ ($x = q_a/Q$), o sea, que en conjunto el período no esté saturado. Así, sólo cabe que haya sobresaturación durante el subperíodo punta pero el período total debe tener una duración suficiente para que ella sea absorbida totalmente a su interior. La ec. (13) se cumple siempre para $x \leq 0,85$, ya que $z \leq 2$.

Hecha una primera periodización, con el método que sea, debe verificarse entonces el cumplimiento de estas condiciones en aquellos períodos con $x > 0,85$ para todos los movimientos involucrados. De no cumplirse, habrá que extender el período hasta que ello ocurra. La extensión modifica la duración y los flujos promedio de los períodos previo y posterior por lo que estas y otras verificaciones pueden no resultar simples. El problema es ciertamente más complejo cuando se trata de periodizar una red con varias intersecciones. En el proyecto SCAT de Santiago se ha generado un algoritmo para llevar a cabo esta tarea, que ha dado buen resultado. Será reportado en otro lugar.

Conviene destacar que si se hace necesaria una extensión para aumentar T_f , el uso de un modelo simétrico para la demanda obliga a cambiar también el inicio del período lo que no siempre es beneficioso para el ajuste del modelo con los datos de flujo. Esto hace muy atractiva la búsqueda de modelos no simétricos. No obstante, mientras no se cuente con ellos es claramente preferible recurrir a uno simétrico, aunque su ajuste no sea tan bueno, antes que continuar suponiendo demanda constante.

Por otro lado, el empleo de un modelo de demanda variable quita dramatismo a trabajar con períodos punta más extensos. La costumbre de identificar períodos punta "cortos" tiene sentido si las demoras se estiman con demanda constante, no en esta nueva alternativa. En este contexto, la introducción de demanda variable es una positiva contribución a una mejor periodización.

3.2. ESTIMACION DE DEMORAS

Una vez definidos períodos tratables independientemente, el problema se reduce a estimar la demora media en cada uno de ellos, lo que ofrece alguna dificultad sólo en aquellos en que hay variación sistemática del flujo y alto grado de saturación. Esto se resuelve con el método descrito en la sección 2.2. Para aplicar la ec.(6) hay dos situaciones diferentes: si $x_p \leq 1$ o $x_p > 1$.



a) $x_p \leq l$

Recordando las ecs. (9a,b) y designando por d_n a $d_i = d_f$, la ec.(6) queda:

$$d = \frac{l}{2} \left[d_n \frac{q_n}{q_a} + d_p \frac{q_p}{q_a} \right] \quad (14)$$

que sustituyendo q_n y q_p mediante las ecs.(2) y (3) y reordenando, conduce a:

$$d = d_p - (d_p - d_n) \frac{4-z}{8}. \quad (15)$$

b) $x_p > l$

Con las ecs.(10) y (11a,b) la ec.(6) queda:

$$d = \frac{d_n q_n}{2 q_a} \left(1 - \frac{x_p - l}{l - x_n} \right) + \frac{d_p q_p}{2 q_a} + \frac{d_p q_n}{2 q_a} \frac{x_p - l}{l - x_n}. \quad (16)$$

Reemplazando y tras bastante trabajo algebraico, se llega a:

$$d = d_p - (d_p - d_n) \frac{4-z}{4+z} \frac{x}{l-x}. \quad (17)$$

En ambos casos se obtiene una fórmula simple, basada en d_n y d_p , que se calcula con las ecs. (7) y (8), con los valores correspondientes de las variables para cada subperíodo. Esto implica aplicar dos veces las fórmulas de demora conocidas y un solo dato adicional: z , para cada movimiento. Pero por la ec.(1) z resulta del flujo promedio del período (q_a), dato tradicional, y q_l . Establecida la periodización, conocer q_l es sencillo: corresponde al mayor entre el flujo del intervalo previo al inicio del período y el del intervalo siguiente a su término.

Estas fórmulas se pueden sintetizar en:

$$d = d_p - (d_p - d_n) \frac{4-z}{4+g(x)}. \quad (18)$$



donde

$$g(x) = 4, \quad \text{si } x \leq \frac{4}{4+z} \quad (19a)$$

$$= \frac{zx}{1-x}, \quad \text{si } \frac{4}{4+z} < x < 1. \quad (19b)$$

La forma que se ha dado a la ec.(18) hace evidente que d_p sobreestima la demora media de los vehículos llegados en el período total (d). En efecto, $(d_p - d_n) > 0$ y el factor que lo multiplica es no negativo. Si $x_p \leq 1$, el factor varía entre $1/4$ y $1/2$, según sea el valor de z ; si $x_p > 1$, el factor varía entre $\frac{1-x}{2-x}$ y 1 , un rango mayor. En todo caso, el factor decrece si z aumenta pero $(d_p - d_n)$ crece en esa eventualidad. No es entonces predecible con claridad en qué condiciones la magnitud de la sobreestimación será más pequeña, aunque hay indicios de que esto sucederá si z es más alto.

3.3. CUANDO APLICAR DEMANDA VARIABLE

Se ha afirmado antes que la variación del flujo al interior de un período es relevante para la estimación de demoras cuando el grado de saturación del período es alto. Ahora se puede estudiar con más detalle este punto. Inspeccionando la ec.(18) se observa que si la diferencia $(d_p - d_n)$ es reducida bastará con d_p para estimar d . Esta hipótesis se dará si hay poca diferencia entre x_p y x_n , caso en el cual d_p será en realidad muy cercana a calcular la demora media con el flujo promedio q_a , sin distinguir subperíodos. Esta situación se presenta si z tiene un valor muy bajo, es decir, cuando la variación del flujo en el período es prácticamente despreciable.

La componente uniforme de la demora evoluciona más o menos linealmente con el grado de saturación, en tanto la componente excedente es fuertemente convexa. Esta última adquiere un peso significativo sólo a partir de grados de saturación del orden de un 85%. Es por ello que la existencia de variabilidad tiene impacto perceptible únicamente para grados de saturación altos. En rigor, no se cometería mayor error si la componente uniforme se estima siempre con las condiciones promedio del período total y sólo se usan las fórmulas con d_p y d_n para la componente excedente.

Este análisis indica que un alto grado de saturación promedio del período es condición necesaria pero no suficiente para la introducción de un modelo de demanda variable. Debe haber además manifestación de la existencia de variabilidad. Detectarla a simple vista no es siempre fácil por las imperfecciones típicas de la medición de flujos en las proximidades de la saturación. No parece sencillo desarrollar una medida objetiva de esta manifestación que sea confiable. Pero suponer demanda variable cuando en realidad es aproximadamente constante no implica riesgo de mala



estimación de la demora, por las características del modelo propuesto. El único costo sería calcular d_p y d_n pudiendo haber calculado un solo valor con el flujo promedio.

De aquí que se recomienda centrarse en la condición necesaria referida. Basándose en el resultado de algunas simulaciones, se concluye que si $x_p \leq 0,9$ se puede ignorar cualquier eventual variación sistemática del flujo y aplicar el modelo convencional de demanda constante. Entonces, para un movimiento que en cierto período tiene un grado de saturación x y un parámetro de agudeza z se recomienda:

- a) si $x \leq \frac{3,6}{4+z}$, estimar d con demanda promedio;
- b) si $\frac{3,6}{4+z} < x \leq \frac{4}{4+z}$, estimar d con ecs. (18) y (19a);
- c) si $\frac{4}{4+z} < x < 1$, estimar d con ecs. (18) y (19b).

En cualquier caso, la tasa media de demora D en el período, se calcula con:

$$D = d q_a. \quad (20)$$

La validez de la expresión anterior descansa en la imposición de que la duración del período sea suficiente para que no quede cola determinística a su final.

3.4. IMPLICANCIAS PARA LA PROGRAMACION DE SEMAFOROS

Por las razones que han sido expuestas, se supone que la programación del semáforo se mantiene durante todo el período aunque el flujo varíe dentro de él. Subsiste la pregunta de cuál debe ser esa programación. Como es sabido, ella se determina a partir de las demoras y otros indicadores de rendimiento. Pero según lo visto en la sección precedente, la fórmula a aplicar para estimar la demora depende de x , o sea, de la programación. Aparece una circularidad que es necesario romper.

Consideremos primero el caso de una intersección aislada, en que las variables de programación son el tiempo de ciclo y el reparto. Lo más lógico es determinarlas para el subperíodo punta, que es el crítico en materia de capacidad. Esto nos sitúa en el problema estándar de obtener la programación para un período determinado, con demanda constante. En vez de usar el flujo q_a para cada movimiento se usará $q_p = (1 + z/4) q_a$. La innovación consiste en que hay que estimar las demoras

medias para el período total en un paso posterior, una vez determinada la programación. La fórmula a aplicar para cada movimiento de la intersección dependerá del par (x, z) correspondiente.

Este procedimiento refuerza la importancia de adoptar una óptica global para la periodización. El subperíodo punta, para el que se determinará la programación, debe ser el mismo para todos los movimientos de la intersección. El método sugerido por Akcelik y Roupail para la elección de dicho subperíodo no tiene en cuenta este aspecto.

Consideremos ahora el caso de intersecciones semaforizadas en red. La programación es más compleja por cuanto el tiempo de ciclo debe determinarse para la red, los repartos para cada intersección y se agrega una nueva variable: los desfases. Si se usa TRANSYT (Vincent et al., 1980) es factible implementar una estrategia similar a la del caso anterior. En un primer paso se determina ciclo y repartos con los datos del subperíodo punta, con el criterio de equisaturación para los repartos. Luego hay que obtener los desfases, etapa que merece mayor análisis pues aquí entra en juego un proceso de optimización basado en la estimación de demoras.

La optimización de desfases está en esencia relacionada con la componente uniforme de demoras y detenciones. Como se explicó en la sección precedente, esta componente no está afectada de manera significativa por la existencia de variabilidad en los flujos. Sin embargo, si hay sobresaturación en un movimiento, TRANSYT limita el flujo que pasa a la capacidad de ese movimiento, lo que tiene consecuencias aguas abajo en la simulación. Por otra parte, TRANSYT ignora los efectos de bloqueo hacia atrás que pueden originar los movimientos saturados. Entonces, el subperíodo punta parece poco apropiado como condición para determinar los desfases, a diferencia del tiempo de ciclo y los repartos. La recomendación es: dadas estas últimas variables, optimizar desfases con los flujos promedio del período total. Es decir, ignorar aquí la variación sistemática de los flujos.

Obviamente, en este esquema no cabe la optimización de repartos en el mismo proceso de la de los desfases. Si se desea hacerla, habría que volver al subperíodo punta, introducir los desfases obtenidos como datos y optimizar sólo repartos. Con los nuevos repartos, se retorna a las condiciones promedio y se repite la optimización de desfases, iterando cuantas veces sea necesario.

La última etapa es estimar, para fines de evaluación, las demoras (y otros indicadores de rendimiento) en el período total con la programación determinada. Esto requiere introducir en TRANSYT las nuevas expresiones para el cálculo de la componente excedente (ecs. 18 y 19a,b aplicadas en esa componente). Debería revisarse también la forma de calcular las detenciones excedentes y la extensión máxima de la cola. Con respecto a esta última, parece mejor evaluarla en una simulación del subperíodo punta.

4. COMENTARIOS FINALES

El serio problema de subestimación de las demoras en períodos punta que presentan los métodos actuales, puede ser superado con una sencilla modificación de la forma de estimar las demoras en tales períodos. Cuando se dan las condiciones en que es necesario introducir un modelo de demanda



variable, se debe calcular dos valores de demora media en subperíodos con las fórmulas convencionales y combinarlos mediante la ec.(18). Además, se requiere un solo dato adicional, q_i , típicamente disponible. Se ha identificado en el trabajo la condición en que debe introducirse esta corrección, en términos de un valor límite para el grado de saturación de cada movimiento (o pista, si esa es la unidad de análisis). Queda claro que la sugerencia de Akcelik y Rouphail de usar como estimador de la demora media total la del subperíodo punta puede originar una innecesaria sobreestimación.

Sin embargo, la consideración de demanda variable tiene repercusiones más complejas en otros ámbitos: periodización y programación de semáforos. En cuanto a periodización, se propone un refinamiento del método en uso para lograr una definición apropiada de la duración de un período punta, consistente con la estimación independiente de las demoras para cada período (punta o fuera de punta). Este refinamiento sólo entra en juego para períodos cuyo grado de saturación promedio es superior a 85%.

Para la programación de semáforos, bajo el supuesto de que opera el mismo plan durante todo el período, se propone un procedimiento por etapas, con distintas características según se trate de una intersección aislada o en red. Como esa actividad se realiza con programas computacionales, la correcta estimación de las demoras e indicadores para evaluación precisa que sean modificados para introducir la nueva fórmula de demora y el nuevo dato. En el caso de TRANSYT, el dato puede ingresarse mediante las tarjetas de escalamiento de flujos (tipo 36, en TRANSYT-8). No obstante, el procedimiento recomendado para la programación misma de los semáforos puede aplicarse desde ya, sin necesidad de versiones modificadas de los programas computacionales.

Como se ha dicho, la incorporación de demanda variable y el tratamiento de los períodos punta que trae aparejado, arrojan nueva luz sobre la periodización. Hasta ahora sólo se ha desarrollado un algoritmo que parte de la solución que entrega el método tradicional. Es recomendable revisar este último de manera más integral, orientándolo primero a buscar períodos punta y luego a distinguir períodos en el resto del tiempo. Otro aspecto relacionado que requiere mayor investigación es un modelo de demanda variable no simétrico, que puede flexibilizar la periodización facilitando un mejor ajuste a los patrones reales de flujo.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) de Santiago el apoyo brindado a esta investigación a través del proyecto SCAT. Han contribuido también a la concepción de los métodos propuestos los consultores a cargo del proyecto, en particular M. Zucker e I. Baeza, con discusiones a veces intensas.

REFERENCIAS

Akcelik, R. (1981) Traffic signals-capacity and timing analysis. **Research Report ARR 123**, Australian Road Research Board, Melbourne, Australia.



Akcelik, R. (1988) The Highway Capacity Manual delay formula for signalized intersections. **ITE Journal**, **58** (3), 23-27.

Akcelik, R. y Roupail, N. (1993) Estimation of delays at traffic signals for variable demand conditions. **Transportation Research B**, **27 B** (2), 109-131.

Brilon, W. y Wu, N. (1989) Delays at fixed-time traffic signals under time-dependent traffic conditions. **Traffic Engineering and Control**, **31** (12), 623-631.

Hadjes, V. y Gibson, J. (1990) Un método de periodización para proyectos de vialidad urbana. **Actas del VI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte**, Universidad del Cauca, Colombia, 10-13 Julio 1990.

Kimber, R. y Hollis, E.M. (1979) Traffic queues and delays at road junctions. **Laboratory Report 909**, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

SECTU (1988) **Manual de Diseño y Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana**, Santiago.

Vincent, R.A., Mitchell, A.I. y Robertson, D.I. (1980) User guide to TRANSYT version 8. **Laboratory Report 888**, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

