

Incorporación de la Variabilidad Temporal de los Flujos en el Cálculo de las Demoras en Semáforos

Eduardo Valenzuela F.
ABSA Ingenieros Ltda.
Agustinas 1810 Oficina 601, Santiago, Chile
Fono: +56-2-687 4405
e-mail: evalenzuela@absa.cl

Rodrigo Fernández A.
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes
Av. San Carlos de Apoquindo 2200, Las Condes, Santiago, Chile
Fono +56-2-412 9321; Fax: +56-2-214 1752
e-mail: rfa@miuandes.cl

RESUMEN

Los métodos de estimación de demoras en intersecciones semaforizadas consideran que tanto el flujo vehicular como la capacidad son constantes, en promedio, durante el período de modelación. Sin embargo, diversas investigaciones (Akçelik, and Roupail, 1993; Gibson, 1995) han probado que ante presencia de demanda variable, las fórmulas tradicionales subestiman la demora media. Este trabajo tiene por objetivo definir lineamientos prácticos en torno a cuándo considerar la variabilidad temporal del flujo para el cálculo de las demoras en semáforos en períodos punta. Para ello, se utilizó como herramienta de análisis una rutina en lenguaje FORTRAN con la cual se probaron más de 12.000 combinaciones variables simulando un cruce semaforizado aislado en una nueva versión de TRANSYT 8S. Los resultados indican que a partir de intensidades punta 0,5 sería necesario considerar la variación del flujo dentro del período y que, para redes arteriales, las diferencias son mayores que para redes bidimensionales, lo que sugiere utilizar el método principalmente en ejes semaforizados.

Palabras claves: demoras en semáforos, modelación de tráfico, TRANSYT.

ABSTRACT

The method for estimating delays at traffic signals considers that both flow and capacity are average constant values during the modelling period. However, some researches (Akçelik, and Roupail, 1993; Gibson, 1995) have shown the inadequacy of such an assumption during peak periods. The objective of this work is to define practical guidelines to allow the engineer to decide when to use average values or other approaches to calculate delays at signals. A subroutine wrote in FORTRAN was used to test more than 12,000 combinations of variables to simulate an isolated signal using a modified version of the TRANSYT 8S software. Results indicate that when the peak hour factor is greater than 0.5 would be necessary to take into account the flow variability in that period. In addition, in arterial networks the differences with respect to the traditional method are greater than in bidirectional networks.

Keywords: delays at traffic signals, traffic modelling, TRANSYT

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Tradicionalmente los métodos de estimación de las demoras en intersecciones semaforizadas consideran que tanto el flujo vehicular como la capacidad son constantes, en promedio, durante el período de modelación. Sin embargo, diversas investigaciones (Akçelik, and Roupail, 1993; Gibson, 1995) han probado que ante presencia de demanda variable, las fórmulas tradicionales subestiman la demora media.

Durante 2001 a 2002 los autores participaron en el estudio denominado "Análisis modificación programa TRANSYT 8S" para la Unidad Operativa de Control de Tránsito de la Región Metropolitana (DIC, 2003). Como parte de dicho estudio se modificó el código fuente del programa original incorporando algunas mejoras para una modelación más acertada de los fenómenos inherentes a la circulación de personas y vehículos en áreas urbanas.

El presente trabajo está basado en dicho estudio y tiene por objetivo definir lineamientos prácticos en torno a cuándo considerar la variabilidad temporal del flujo para el cálculo de las demoras en semáforos en períodos punta.

2. SÍNTESIS DEL PROBLEMA

Las demoras promedio en un acceso semaforizado por el cual llega un flujo promedio q_a se puede calcular según Akçelik (1993) como:

$$d = du + das \quad (1)$$

$$D = q_a d \quad (2)$$

Donde d es la demora promedio por vehículo [veh-h/veh] y D es la tasa de demora por unidad de tiempo en [veh-h/h]; du es la componente uniforme de la demora y das es la componente excedente o componente aleatoria y por sobresaturación eventual.

La componente uniforme se calcula a partir del ciclo C del semáforo, el flujo promedio q_a , de la capacidad Q del acceso, de su razón de verde efectivo u y de su grado de saturación x como:

$$du = \begin{cases} \frac{C(1-u)^2}{2(1-ux)}, & \text{si } x \leq 1 \\ \frac{C(1-u)}{2}, & \text{si } x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

La componente excedente, por su parte, se puede calcular, también siguiendo a Akçelik (1993), como:

$$das = \begin{cases} \frac{t}{4} \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8k(x-x_0)}{Qt}} \right], & \text{si } x > x_0 \\ 0, & \text{si } x \leq x_0 \end{cases} \quad (4)$$

Donde t es el período de cálculo en que se asume que tanto q_a como Q se mantienen constantes y x_0 es el grado de saturación para el cual el efecto excedente comienza a manifestarse. Akçelik and Rouphail (1993) sugieren usar $x_0 = 0,5$ y el valor de k igual a:

$$k = 1,22(S \cdot v_e)^{-0,22} \quad (5)$$

Donde S es el flujo de saturación del acceso en [veh/s] y v_e es el verde efectivo del acceso en [s]. El producto Sv_e es la capacidad del acceso en vehículos por ciclo. Los valores 1,22 y -0,22 son parámetros. Sin embargo, lo anterior ignora que en algún período T dentro de t se presente alguna fluctuación en el nivel de flujo (Akçelik and Rouphail, 1993). Esta variación puede adoptar la forma de una punta dentro del período, la que se podría representar por una función triangular simétrica, como muestra la Figura 1.

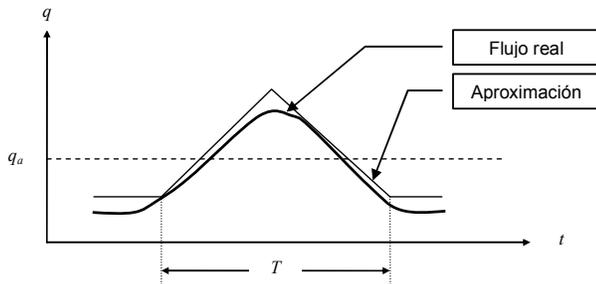


FIGURA 1: Variación de Flujo Representado por una Función Triangular

Para efecto de cálculo de la das con las fórmulas previas, la función triangular puede, subsecuentemente, aproximarse por un histograma escalonado y simétrico, como el de la Figura 2, en que el efecto se ha intensificado para efectos de la exposición.

Gibson (1995) plantea que bajo ciertas condiciones es aconsejable considerar la variabilidad del flujo para el cálculo de la demora. En caso contrario, se puede ignorar tal variación y proceder a calcular la demora mediante el flujo promedio q_a como se hace tradicionalmente.

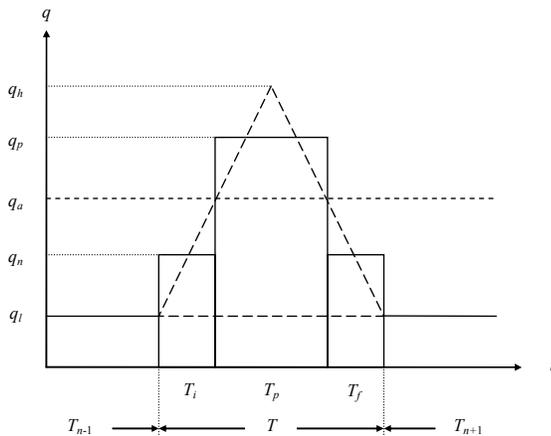


FIGURA 2: Aproximación a la Variación del Flujo durante un Período

Las condiciones para las cuales se debe considerar la variación del flujo son las siguientes:

- $x > 0,85$
- $x \geq 4 / (4 + z)$
- $x_p > 0,9$

Donde x es el grado de saturación promedio del período, z es la intensidad de la punta y x_p es el grado de saturación durante la punta. Las dos últimas variables se calculan como sigue, según las variables definidas en la Figura 2.

$$z = \frac{q_h - q_l}{q_a} \quad (6)$$

Dado que $q_a = \frac{1}{2}(q_l + q_h)$, entonces:

$$z = 2 \left(1 - \frac{q_l}{q_a} \right) \quad (7)$$

Donde q_l se puede obtener del flujo promedio de los períodos anterior y posterior a T como:

$$q_l = \max\{q_a(T_{n-1}), q_a(T_{n+1})\} \quad (8)$$

Luego, por simetría, se pueden plantear las siguientes igualdades:

$$q_p = \left(1 + \frac{z}{4} \right) q_a, q_n = \left(1 - \frac{z}{4} \right) q_a \quad (9)$$

$$T_p = \frac{T}{2}, T_i = T_f = \frac{T}{4} \quad (10)$$

Sean x_p y x_n los grados de saturación durante el escalón de la punta y durante el escalón anterior a la punta, respectivamente; es decir:

$$x_p = \frac{q_p}{Q} \quad (11)$$

$$x_n = \frac{q_n}{Q}$$

Con todo lo anterior, Gibson (1995) mostró que la demora excedente se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$das = d_p - (d_p - d_n) \frac{4 - z}{4 + g(x)} \quad (12)$$

Donde:

$$d_p = \frac{T_p}{4} \left[(x_p - 1) + \sqrt{(x_p - 1)^2 + \frac{12(x_p - x_0)}{QT_p}} \right] \quad (13)$$

$$d_n = \frac{T_n}{4} \left[(x_n - 1) + \sqrt{(x_n - 1)^2 + \frac{12(x_n - x_0)}{QT_n}} \right] \quad (14)$$

$$g(x) = \begin{cases} 4, & \text{si } x < \frac{4}{4+z} \\ \frac{zx}{1-x}, & \text{si } \frac{4}{4+z} < x < 1 \end{cases} \quad (15)$$

3. PRUEBA DEL MÉTODO

El anterior desarrollo fue analizado para diferentes casos. Para ello, se desarrolló una subrutina en lenguaje FORTRAN con la cual se probaron 12.628 combinaciones de parámetros y variables. Mayores detalles pueden verse en Ulloa (2008). La Tabla 1 muestra las variables y parámetros estudiados. Para todos los casos, el tiempo de ciclo fue fijado en 100 segundos, valor frecuentemente usado en períodos punta en Santiago.

TABLA 1: Valores de Variables y Parámetros Analizados

Variable o parámetro	q_s [veh/h]	u []	T [h]	z []
Cota inferior	500	0,2	0,5	0
Variación	100	0,1	0,1667	0,05
Cota superior	1500	0,8	1,0	2,0

Por razones de espacio, los resultados de todas las combinaciones no se presentan. A modo de ilustración, en la Tabla 2 se presenta la diferencia entre el método tradicional y el propuesto por Gibson (1995) de uno de los casos. La Figura 3 grafica estos resultados.

TABLA 2: Resultados de Diferencias para $u = 0,5$; $x = 0,89$ y $T_p = 15$ min

Intensidad punta (z)	Demora tradición [veh-h/veh]	Demora Gibson, 1995 [veh-h/veh]	Diferencia c/r tradición [%]
0,10	0,008	0,008	0
0,15	0,008	0,008	0
0,20	0,008	0,009	12,5
0,25	0,008	0,009	12,5
0,30	0,008	0,009	12,5
0,35	0,008	0,009	12,5
0,40	0,008	0,009	12,5
0,45	0,008	0,010	25,0
0,50	0,008	0,010	25,0
0,55	0,008	0,011	37,5
0,60	0,008	0,012	50,0
0,65	0,008	0,012	50,0
0,70	0,008	0,013	62,5
0,75	0,008	0,014	75,0
0,80	0,008	0,015	87,5
0,85	0,008	0,016	100,0
0,90	0,008	0,017	112,5
0,95	0,008	0,018	125,0
1,00	0,008	0,019	137,5

De los resultados, dos son los factores que más influyen en la diferencia entre el cálculo de las demoras según el método tradicional y el propuesto por Gibson (1995). Estas son la longitud del período punta T_p y el valor del parámetro z que indica la intensidad de la punta en el período. Se puede observar que a partir de $z = 0,45$ las diferencias son importantes y que a partir de $z = 0,5$ estas crecen pronunciadamente.

Con el objeto de estudiar el efecto práctico de estas diferencias, se hicieron corridas con la versión modificada de TRANSYT 8/S, en tres redes reales con distintas características: Copiapó, Talca y San Bernardo. Éstas se muestran en las Figuras 4 a 6.

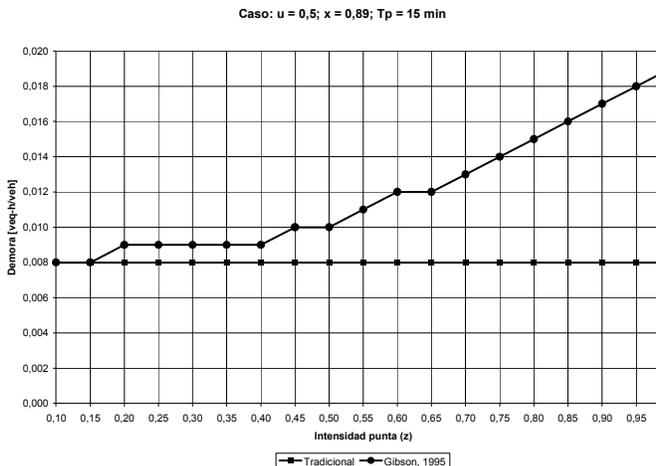


FIGURA 3: Ejemplo Diferencia entre Método Tradicional y Gibson (1995)

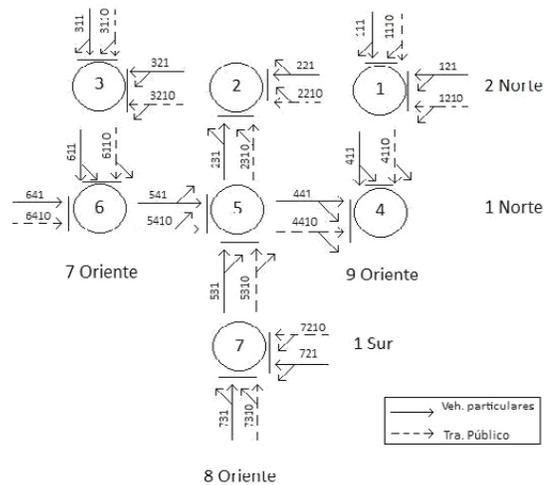


FIGURA 4: Red TRANSYT, Ciudad de Talca

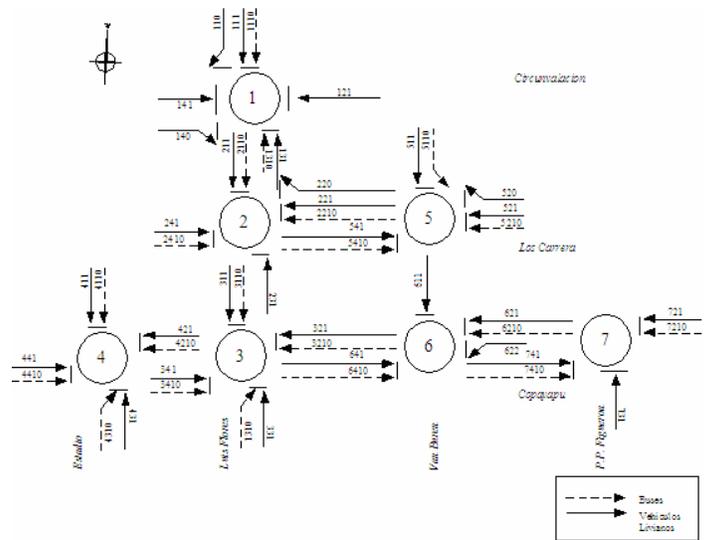


FIGURA 5: Red TRANSYT, Ciudad de Copiapó

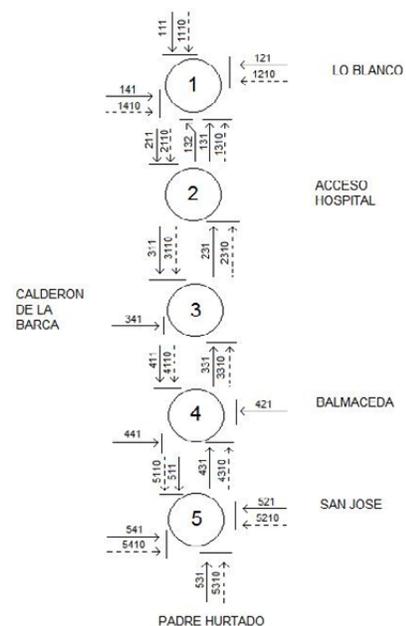


FIGURA 6: Red TRANSYT San Bernardo

En cada una de las redes se estudió el efecto de utilizar el método de cálculo de demoras de Gibson (1995) *versus* el no hacerlo. Para analizar la importancia de ello, se probaron distintos valores de intensidad de la punta (z) entre 0,1 y 2,0.

Los resultados agregados de las corridas se muestran en la Tabla 3 que indica el índice de rendimiento de la red (IR), la tasa de demora total (D) y el consumo de combustible (CC). Se indica también la diferencia con respecto al método tradicional.

TABLA 3: Comparación de Salidas TRANSYT con Métodos Tradicional y Gibson (1995)

IR [\$/h]	Copiapó			Talca			S.Bernardo		
	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia
z									
0,10	273,30	282,50	-3	98,50	98,50	0	162,80	171,70	-5
0,50	273,30	282,50	-3	93,60	98,50	-5	165,40	171,70	-4
1,00	316,20	282,50	12	114,20	98,50	16	221,30	171,70	29
1,50	511,90	282,50	81	175,60	98,50	78	312,70	171,70	82
2,00	687,70	282,50	143	246,00	98,50	150	415,40	171,70	142

D [veq-h/h]	Copiapó			Talca			S.Bernardo		
	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia
z									
0,10	70,30	73,30	-4	27,60	27,60	0	43,70	46,30	-6
0,50	70,30	73,30	-4	26,00	27,60	-6	44,00	46,30	-5
1,00	83,30	73,30	14	32,40	27,60	17	61,70	46,30	33
1,50	143,70	73,30	96	51,90	27,60	88	90,70	46,30	96
2,00	200,50	73,30	174	74,80	27,60	171	123,70	46,30	167

CC [L/h]	Copiapó			Talca			S.Bernardo		
	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia	Gibson,1995	Tradicional	% diferencia
z									
0,10	1.424,90	1.390,00	3	784,20	764,90	3	863,70	845,10	2
0,50	1.563,90	1.390,00	13	860,70	764,90	13	954,70	845,10	13
1,00	1.738,70	1.390,00	25	956,00	764,90	25	1.064,40	845,10	26
1,50	1.954,80	1.390,00	41	1.051,70	764,90	37	1.170,80	845,10	39
2,00	2.137,00	1.390,00	54	1.139,90	764,90	49	1.275,10	845,10	51

De la tabla se observa que tanto para IR como para D no hay diferencias entre los métodos en todas las redes, si la intensidad de la punta es menor o igual 0,5. Sin embargo, para valores de z iguales o mayor que 1,0 las diferencias superan el 12%.

Esta es una diferencia importante considerando que la optimización de una red de semáforos logra mejoras de ese orden de magnitud. Esto concuerda con los resultados teóricos mostrados en la Tabla 2 y Figura 3.

En el caso del consumo de combustible, la diferencia es más importante para $z = 0,5$. Sin embargo, la estimación de estos consumos no es tan precisa como en el caso de D o IR .

Lo anterior se comprueba observando que las diferencias entre redes topológicamente distintas no es ostensible, como ocurre en el caso de IR y D .

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha probado desde una perspectiva aplicada que utilizar valores promedios de flujos y capacidades para estimar demoras en períodos punta no siempre produce resultados correctos, subestimándose los resultados.

Un resultado práctico de alto interés para es que para la red más lineal (San Bernardo), las diferencias se hacen más notorias para $z = 1,0$ que para las otras redes que son bidimensionales. Esto sugiere la necesidad de usar el método de Gibson (1995) principalmente en ejes semaforizados.

En resumen, como conclusión práctica, a partir de $z = 0,5$ sería necesario considerar la variación del flujo dentro del período. Esto significa que el flujo promedio en el período T sea un 33% mayor que en el período anterior.

REFERENCIAS

- Akcelik, R. (1993). **Traffic signals: capacity and timing analysis**. Research Report ARR 123, Australian Road Research Board Ltd.
- Akçelik, R. and Roupail, N (1993). Estimation of delays at traffic signals for variable demand conditions. **Transportation Research B** 27(2), 109-131.
- DIC (2003). **Análisis Modificación Programa TRANSYT 8S**. Informe Final para Unidad Operativa de Control de Tránsito. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Gibson, J. (1995). Estimación de demoras en intersecciones semaforizadas en períodos punta. **Actas del VII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 291-305.
- Ulloa, F. (2008). **Modelación TRANSYT del efecto de la variabilidad temporal de los flujos en las demoras en semáforos**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de los Andes.