

MODELACION DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS AISLADAS:  
MODIFICACIONES A SIGSET

Mónica Woywood Y.  
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.  
Casilla 53-C, Concepción.

Juan Enrique Coeymans A.  
Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia  
Universidad Católica de Chile, Casilla 6177, Correo 22,  
Santiago.

RESÚMEN

En la actualidad entre los programas más conocidos para optimizar tanto el ciclo como los repartos de verde de una intersección semafORIZADA aislada están SIGCAP, que maximiza la capacidad y SIGSET, que minimiza las demoras de la intersección.

El presente trabajo entrega las modificaciones introducidas a SIGSET, que consisten básicamente en utilizar otras funciones objetivos aparte de la demora total, entre ellas el número de detenciones y el consumo de combustible.

Paralelamente se entrega las calibraciones efectuadas, a partir de mediciones intensivas realizadas en la ciudad de Santiago, de la fórmula para cuantificar el número de detenciones.

Finalmente se explican las modificaciones introducidas al programa a fin de hacerlo más amigable al usuario en la entrada de datos, así como en la determinación del número y secuencia de etapas para la operación óptima del semáforo.

## 1.0 INTRODUCCION

Entre los programas más utilizados para determinar tanto el ciclo como los repartos de verde óptimos para una intersección semaforizada aislada, tratando de maximizar la capacidad o de minimizar las demoras, están SIGCAP y SIGSET, respectivamente.

Ambos programas fueron elaborados a principios de la década del setenta, época en que el desarrollo de los computadores y del software eran incipientes.

Aparece por lo tanto interesante el investigar estos modelos, rediseñar las funciones objetivos a optimizar, para considerar no sólo las demoras y capacidad de la intersección, sino que también incluir las detenciones (número de paradas), consumo de combustible y algunas externalidades ambientales.

Se estudia con mayor detalle el modelo lineal de tasa de paradas, a través de un análisis experimental. La recolección de antecedentes se realiza en la ciudad de Santiago para movimientos semaforizados aislados, ajustándose una regresión lineal a los datos obtenidos en terreno.

Se incorpora el concepto de compatibilidad de movimientos para que el programa sea capaz de generar conjuntos de etapas factibles, de tal forma que el usuario pueda obtener el set óptimo de etapas según la medida de performance a optimizar.

Se rediseña la entrada de datos (haciéndola interactiva) de tal forma de hacer de este programa una herramienta de fácil empleo.

En la actualidad existen otros programas para evaluar estas medidas: OSCADY (Burrow y Willoughby, 1985) y SIDRA (Akcelik, 1987). Estos programas son más sofisticados y permiten analizar períodos sobresaturados, requieren de una entrada de datos más acabada y están recién disponibles en el mercado.

## 2.0 MEDIDAS DE PERFORMANCE

La eficiencia operacional de una intersección semaforizada se expresa en términos de sus características operativas o medidas de performance.

La demora y el número de paradas son dos medidas básicas de performance, a partir de éstas se pueden derivar otras secundarias como: consumo de combustible, emisión de polutantes y costos: costos de operación de los vehículos y costo de tiempo de las personas.

En forma general la demora se define como la diferencia

entre los tiempos empleados en recorrer una distancia determinada en forma interrumpida y no interrumpida, interrupción debida a la existencia del semáforo. Por lo tanto, la demora incluye el tiempo empleado en la deceleración y la aceleración que acompaña la detención, y el tiempo efectivamente detenido ante el semáforo.

Por otro lado, se considera en forma general, que todo vehículo que sufre demora, sufre una detención. Un vehículo que desacelera sin llegar a detenerse, sufre una detención o parada parcial.

La longitud de colas o el número de vehículos detenidos en la cola, es otra medida de performance. Es de particular importancia, si el espacio de almacenamiento está restringido por condiciones geométricas de la intersección, por ejemplo, si en la cercanía de ella desemboca una calle lateral.

La capacidad y el grado de saturación son las otras medidas básicas de performance. El grado de saturación afecta en forma directa a la demora, al número de paradas y a la longitud de cola. Las características de operación de la intersección se deterioran rápidamente con el grado de saturación, en especial para valores mayores a 0.8. El grado de saturación mide en forma directa el nivel de servicio de la intersección.

Hasta la fecha se han desarrollado básicamente métodos para determinar el ciclo y reparto de verde óptimos en base a minimizar la demora total que experimentan los usuarios de la intersección o a maximizar la capacidad de la intersección. Ambos métodos han sido resueltos computacionalmente, en forma satisfactoria, para intersecciones semaforizadas aisladas.

Entre los costos de operación de los vehículos, se destaca el consumo de combustible. Este consumo se ve afectado por la velocidad de travesía, la demora y el número de paradas que sufren los vehículos. Dado que la demora, a su vez también depende del número de paradas parece interesante el investigar el modelo de paradas.

¿Qué pasa si en vez de minimizar la demora se minimiza el número de paradas?

Por otro lado, ¿qué pasa si se minimizan ambas funciones a través del consumo de combustible?

### 3.0 MODELACION TASA DE PARADAS.

#### 3.1 Aspectos Teóricos.

Al número de paradas completas por vehículo se le denomina tasa de paradas.

Los modelos para predecir la demora, el número de paradas y la longitud de cola pueden considerarse compuestos de dos componentes: una componente uniforma y otra excedente.

La componente uniforme se basa en la suposición de llegadas regulares, a intervalos constantes, y están relacionadas con el período de rojo del semáforo. La componente excedente incluye efectos aleatorios y de sobresaturación, se expresa a través de una función de cola sobresaturada promedio, es decir, del número promedio de vehículos remanentes en la cola al terminar el período de verde. Esta cola remanente se debe a una sobresaturación que puede durar sólo un par de ciclos (grados de saturación moderados) o puede persistir por un período más largo (grados de saturación altos).

El modelo continuo desarrollado por May (1965) entrega la componente uniforme para el movimiento i:

$$h_i = (1-\lambda_i)/(1-y_i) \quad (1)$$

en que:  $h_i$  = tasa de paradas (No. paradas/veh)

$\lambda_i$  = proporción de verde efectivo ( $g$ ) en el ciclo( $c$ )

$y_i$  = factor de carga, cuociente entre flujo vehicular ( $q$ ) y flujo de saturación ( $s$ ).

El efecto aleatorio en la llegada de los vehículos a la intersección es despreciable para grados de saturación bajos, pero aumenta al aproximarse el grado de saturación a 1, dando como resultado mayores demoras, mayor número de paradas y mayor longitud de cola.

Akcelik (1981) entrega una expresión para determinar la tasa de paradas para intersecciones semaforizadas aisladas:

$$h_i = 0.9 ((1-\lambda_i)/(1-y_i) + N_o/(q c)) \quad (2)$$

El factor 0.9 es un factor de corrección para considerar las paradas parciales, es decir, los vehículos que no alcanzan a detenerse completamente.

El primer término entrega el número de vehículos detenidos independientemente de cuántas veces ellos se detengan, corresponde por lo tanto, a la componente uniforme entregada por May. El segundo término considera las paradas múltiples en ciclos sobresaturados, en que  $N_o$  se estima como:

$$N_o = \begin{cases} Q T_f / 4 [x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + 12(x-x_0)/(Q T_f)}] & \text{para } x > x_0 \\ 0 & \text{para } x \leq x_0 \end{cases} \quad (3)$$

en que:  $N_o$  = cola promedio excedente (veh)

$Q$  =  $sg/c$ ; capacidad (veh/hra)

$T_f$  = período en que son válidos  $q$  y  $Q$  (hra)

$x$  =  $q/T_f$ ; grado de saturación

$x_0 = 0.67 + sg/600$ ; grado de saturación límite bajo el cual no existe cola excedente.

El número de paradas por hora para cada movimiento i es simplemente:  $H_i = q_i * h_i$ .

El número total de paradas por hora en la intersección considera a todos los movimientos :

$$H(\lambda) = \sum_{i=1}^n q_i * h_i \quad (4)$$

### 3.2 Metodología y Recolección de Datos en Terreno

El ajuste de una fórmula para determinar la tasa de paradas de los vehículos, se realizó mediante experimentos efectuados en diferentes intersecciones de la ciudad de Santiago de Chile.

Las principales características del experimento fueron:

- El tamaño de la muestra se determinó a través de un procedimiento práctico, que asegura la aleatoriedad de la muestra, suponiendo que la distribución de los datos es según una curva normal de media  $\mu$  y varianza  $s^2$ . Se define el grado de confianza  $(1-\alpha)=95\%$ , por lo que  $N(\alpha)=1.96$ . Se especifica un error aceptable de  $0.05x$ , en que  $x$  es la media de los datos. Se estima que el tamaño de la muestra debe ser de:

$$n = (N(\alpha) s/e)^2 \Rightarrow n > 15 \quad (5)$$

- Se analizó una muestra de 24 movimientos semaforizados aislados en la ciudad de Santiago.
- Se definió como movimiento semaforizado aislado aquel movimiento que llega al semáforo y no está influenciado aguas arriba de la intersección por otro semáforo, esto implica que no tiene llegadas en pelotones. Se hace esta definición debido a la dificultad de encontrar intersecciones semaforizadas aisladas que cumplieran los requisitos que se mencionan a continuación.
- Se escogió sólo aquellos movimientos que no se vieran afectados, en la cercanía de la intersección, por: estacionamientos de vehículos, paraderos de locomoción colectiva, excesivo flujo de peatones ni giros a la izquierda sin etapa propia (medición " limpia").
- Se realizaron mediciones intensivas a diferentes horas del día, en días típicos de semana (M,M,J) o fin de semana (S,D), de modo que para cada movimiento se tengan a lo menos tres mediciones con distinto grado de saturación, con

$x < 1$ .

La ecuación que se desea calibrar depende de los siguientes parámetros básicos:

$$h = f(q, s, c, g) \quad (6)$$

Estos se deben medir en terreno para cada movimiento. Las mediciones se realizaron en forma manual para períodos con bajo grado de saturación, y con equipo de video durante los restantes períodos.

De la ecuación (6) se tiene:

**q:** corresponde a la tasa de llegadas de los vehículos a la intersección. Para obtener una información detallada, q se mide por ciclo, aguas arriba de la intersección, clasificando los vehículos por categorías en auto, bus y camión.

**c:** es el tiempo real de duración del ciclo que presenta el semáforo en el momento de la medición, con los períodos correspondientes.

**s:** es el flujo de saturación. Para obtener el flujo de saturación se utilizó el método publicado en Road Note 34 (1963). Estas mediciones se realizaron con equipo de video contabilizándose los vehículos en forma manual desde la pantalla del televisor.

Básicamente este método consiste en contar el número de vehículos que cruzan la intersección, una vez comenzado el verde, en intervalos de 6 segundos hasta que comienza el rojo o termina la saturación. Los vehículos se clasifican por categoría en auto, bus y camión.

Para cada intervalo de 6 segundos se determina el número promedio de vehículos,  $q_i$ . Luego, el flujo de saturación para cada intervalo i en  $(\text{veh}/h)$ , está dado por:

$$s_i = q_i * 3600 / 600 = 600 q_i \quad (7)$$

Si se excluyen los intervalos iniciales y finales de la medición en cada ciclo, se obtiene una tasa de descarga más o menos constante, de tal forma que el flujo de saturación correspondiente al movimiento i es:

$$s = \frac{\sum_{i=2}^{n-1} s_i}{(n-2)} \quad (8)$$

en que n es el número de intervalos de ciclos saturados.

La pérdida inicial,  $a_1$ , se obtiene considerando sólo el primer intervalo:

$$a_1 = 6 (s-s_1)/s \quad (9)$$

Para medir la ganancia final,  $a_2$ , interesa conocer, sólo para los ciclos saturados, el número de vehículos promedio que llega en el último intervalo y los tiempos promedios que dura el último intervalo saturado,  $t_n$  ( $t_n=6$ ). Dado que el periodo de conteo incluye al tiempo de amarillo,  $A$ , se define:

$$a = t_n (s-s_n)/s \quad (10)$$

Luego, al tiempo de amarillo se le resta esta cantidad:

$$a_2 = A - a \quad (11)$$

Finalmente, el verde efectivo,  $g$ , se obtiene restando del verde real,  $v_r$ , estas cantidades:

$$g = v_r - (a_1 - a_2) \quad (12)$$

Hay que destacar que las mediciones de flujo de saturación se realizaron principalmente en hora punta AM, debido a problemas de iluminación para el equipo de video. Estas mediciones fueron realizadas en los meses de Abril, Mayo y Junio de este año.

Para obtener la longitud del periodo de medición, se analizó un estudio reciente de Mc Donald y Hounsell (1986) en el cual se establece que:

- Los efectos en la partida de los vehículos se extiende hasta el segundo intervalo de 6 segundos en el 50% de los sitios estudiados. Luego la suposición de que estos efectos están restringidos sólo al primer intervalo de 6 segundos es estadísticamente aceptable, a no ser que el verde real sea menor a 24 segundos.
- Las variaciones horarias en el flujo de saturación promedio sobre el valor verdadero son alrededor de un 2%. Análisis realizados en muestras tomadas a diferentes horas del día, indican que se requiere una muestra con alrededor de 200 conteos de intervalos de 6 segundos, para obtener una precisión de un 2%.
- Los flujos de saturación son significativamente más bajos en condiciones húmedas (lluviosas) que en condiciones secas, reducción de un 6% en promedio.

Debido a estas recomendaciones se considera obtener para el flujo de saturación mediciones mayores a 30 ciclos (recomendación de Road Note 34), con al menos 100 conteos de intervalos de 6 segundos. No se consideran 200 conteos, dado que las mediciones se efectuaron en hora punta, hora en que el flujo vehicular mantiene una cierta uniformidad, tanto en cantidad como en categoría de vehículos.

$h$ : corresponde al número de paradas completas por vehículo del movimiento.

Se determina el número de vehículos que se detiene por efecto de la luz roja del semáforo. Se anota para cada ciclo el número de vehículos que se detiene, clasificándolo en auto, bus y camión.

Se considera que el vehículo se detiene si se pueden distinguir claramente los pernos de la rueda (mediciones en hora fuera de punta). Si la medición se realiza desde la cinta de video, se considera que el vehículo para, si al llegar a la cola ésta está detenida.

Dado que para medir el flujo de saturación Road Note 34 establece que se deben medir a lo menos 30 ciclos para obtener una medición confiable, se ha utilizado este mismo criterio para medir el número de paradas.

No es posible determinar el número de paradas parciales debido al semáforo, dado que la distancia de deceleración es muy variable de un conductor a otro, y de una intersección a otra. Por otro lado tampoco es posible medir el número de paradas múltiples en mediciones realizadas en hora punta, porque no es posible distinguir desde el video la trayectoria total del vehículo: no se puede detectar colas muy largas con la cámara.

### 3.3 Análisis de Resultados

Se obtuvo una muestra con 73 observaciones realizadas en 15 intersecciones de la ciudad de Santiago. Cada medición representa un movimiento semaforizado aislado a una hora y lugar específico. Si se grafican estos valores utilizando la expresión del modelo lineal ( $h$  vs  $(1-\lambda)/(1-y)$ ), se observa que éstos caen en una banda aproximadamente rectilínea, como se muestra en la figura 1.

No obstante, se trató de relacionar la tasa de paradas no sólo con la componente uniforme, sino que incluyendo expresamente en el modelo el grado de saturación a través de una regresión múltiple.

Para calibrar el modelo se utilizó el programa computacional SAS: Stadistical Analysis System (1982), que posee la Pontificia Universidad Católica de Chile.

En la tabla 3.3.1 se aprecia los resultados obtenidos directamente del programa. Se aprecia que el intercepto no es estadísticamente significativo, lo que se confirma en la realidad ya que para un flujo vehicular nulo, la tasa de paradas ha de ser también nula. Por esta razón se realiza un análisis similar al anterior, imponiendo que el intercepto

sea cero. Los resultados de esta calibración se muestran en la tabla 3.3.2.

TABLA N° 3.3.1  
Calibración modelos tasa de paradas.

Expresión matemática ( t student )	R <sup>2</sup>
$h = 1,0877 (1-\lambda)/(1-y) - 0,2568 x + 0,0227$ (9,611) (-3,308) (0,359)	0,6395
$h = 0,8036 (1-\lambda)/(1-y) + 0,1142$ (10,207) (1,888)	0,5890

TABLA N° 3.3.2  
Calibración modelos tasa de paradas, imponiendo intercepto nulo.

Expresión matemática ( t student )
$h = 1,1247 (1-\lambda)/(1-y) - 0,2691 x$ (24,366) (-3,881)
$h = 0,9506 (1-\lambda)/(1-y)$ (79,843)

Los coeficientes calibrados son en este caso mayores a 1.96, valor de t mínimo aceptable para un intervalo de confianza de un 95%.

Se introduce el primer modelo, a pesar de que aparentemente estarían correlacionadas las dos variables, por una razón teórica. El modelo de May es de carácter estacionario y supone llegadas aleatorias y no distingue entre detención completa o parcial. Por lo tanto, dado que en terreno h se midió para detenciones completas, se podría estar subestimando con respecto al modelo de May. Se puede pensar, que si el grado de saturación aumenta, al menos dentro de cierto rango, debiera aumentar el número de detenciones fraccionales. Por otra parte, no aleatoriedad debiera implicar menor número de detenciones y el grado de apelotonamiento estar positivamente correlacionado con x. Luego estos dos factores de subestimación pueden ser recogidos por la variable x.

De las tablas se aprecia que el signo del coeficiente de  $x$  es negativo y el  $t$  de student es alto, lo que confirma la apreciación anterior.

Por otro lado, el modelo continuo afectado por un factor 0.95 también es apropiado. La muestra es representativa y este factor se puede suponer que recoge el efecto combinado de paradas fraccionales y no aleatoriedad.

Sin embargo, la expresión que modela en forma más apropiada la proporción de vehículos que paran debido a la existencia de un semáforo es:

$$h = 1.1247 (1-\lambda)/(1-y) - 0.2691 x \quad (13)$$

#### 4.0 OPTIMIZACION DE SEMAFOROS AISLADOS

##### 4.1 Antecedentes

Hasta la fecha, se ha realizado una gran variedad de análisis sobre la operación de intersecciones semaforizadas aisladas. Los métodos desarrollados para describir la capacidad y la demora han estado disponibles a partir de la década del 50. Este desarrollo ha permitido optimizar planes de operación de semáforos en términos de maximizar la capacidad y de minimizar la demora. Aunque estos enfoques tienen diferentes objetivos, tienen una filosofía común.

Webster (1958) obtiene una expresión aproximada para la demora de cada movimiento. Luego encuentra una secuencia de etapas que minimiza en forma aproximada la demora agregada para los movimientos dominantes de cada etapa. El establece que para un plan de dos etapas, el verde efectivo para los dos flujos dominantes son proporcionales al factor de carga crítico. A pesar de que esta regla se puede extender a planes con más de dos etapas, no permite determinar fácilmente el ciclo y reparto de verde óptimo en intersecciones de geometría complicada y/o con movimientos que tengan pasada en más de una etapa.

Allsop (1981) desarrolla un método iterativo que minimiza la demora total a todos los usuarios de la intersección, algoritmo que se encuentra disponible en el programa computacional SIGSET.

La capacidad de una intersección semaforizada puede ser definida como la cantidad de vehículos que puede cruzar la intersección por hora cuando la llegada de los vehículos está distribuida en proporciones típicas entre los movimientos que llegan a la intersección, y existe cola en a lo menos un movimiento de los que tienen derecho a vía durante el verde. La capacidad depende no sólo de la geometría de la intersección, sino que también del reparto de verde del semáforo.

Webster y Cobbe (1966) entregan un método simple para estimar la capacidad de la intersección. Este método es satisfactorio para casos que contemplen dos etapas y geometría simple.

Allscop (1975) desarrolla un método de programación lineal, algoritmo que se encuentra disponible en el programa computacional SIGCAP. El objetivo de SIGCAP es calcular la capacidad de reserva o de sobresaturación de la intersección, calcula el ciclo y reparto de verde óptimo tal que maximice la capacidad y entrega indicaciones sobre los efectos que tendría sobre la capacidad el variar ya sea el ciclo máximo o especificado, verdes mínimos, flujos de saturación o los grados máximos aceptables de saturación.

Existen ciertas restricciones prácticas que se deben satisfacer para obtener un plan de operación factible:

- La longitud del ciclo no debe ser muy larga o puede estar preespecificada. Usualmente se considera que no debe exceder de 120 segundos.
- El verde efectivo para una etapa no puede ser muy corto para permitir que los peatones puedan cruzar la calzada en forma segura.
- Los grados de saturación de los movimientos no deben ser muy altos, para evitar bloqueos.

Estas restricciones se expresan en forma matemática como:

$$\lambda_0 > L/C_0 \quad (14)$$

$$L\lambda_i - g_{im}\lambda_0 > 0 \quad (i=1,2, \dots m) \quad (15)$$

$$\sum_{i=0}^m a_{ij}\lambda_i > q_j/p_{jsj} \quad (j=1,2, \dots n) \quad (16)$$

$$\text{y por definición: } \sum_{i=0}^m \lambda_i = 1 \quad (17)$$

en que:  $C_0$  = ciclo máximo o especificado (seg)

$L$  = tiempo perdido del ciclo (seg)

$\lambda_i$  = proporción de verde efectivo etapa i del ciclo

$\lambda_0$  = proporción de tiempo perdido del ciclo

$g_{im}$  = verde mínimo etapa i (seg)

$p_j$  = grado máximo aceptable de saturación del movimiento j

$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el movimiento } j \text{ tiene pasada en etapa } i \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$

Siguiendo la nomenclatura de los controladores modernos se define fase como un movimiento que tiene verde y etapa

como una combinación de fases, es decir, un conjunto de movimientos que tienen derecho a via simultáneamente.

#### 4.2 Maximizar la Capacidad

La capacidad práctica de la intersección para llegadas proporcionales a  $q_j$  es  $u^*q_j$ , en que  $u^*$  es el valor máximo que puede asumir  $u$  tal que se permita encontrar una secuencia óptima de etapas que satisfagan las restricciones mencionadas anteriormente, las tasas de llegadas son proporcionales al múltiplo común  $u$  (Allsop, 1971). Luego el problema de programación lineal a resolver es:

$$\begin{aligned} \text{Max } u \\ \text{s.a. Ecs (14), (15), (16) y (17)} \end{aligned} \quad (18)$$

#### 4.3 Minimizar la Demora

Si la intersección no está sobresaturada, se tiene que  $u^* > 1$  y los repartos de verde efectivo  $\lambda^*$  satisfacen las restricciones mencionadas. La demora promedio vehicular de cada rama se puede determinar a través de la expresión simplificada de Webster (1958):

$$d_j = 0.9 [ c(1-\lambda_j)^*/(1-y_j) + x_j^*/2q_j(1-x_j) ] \quad (19)$$

Para minimizar la demora total de la intersección, es necesario encontrar el valor de  $\lambda$  que minimice la suma de las demoras promedio de cada movimiento  $j$ , sujeto a las restricciones, es decir:

$$\begin{aligned} \text{Min } D(\lambda) = \sum_{j=1}^n d_j q_j \\ \text{s.a. ecs (14), (15), (16) y (17).} \end{aligned} \quad (20)$$

#### 4.4 Minimizar el Número de Paradas

El número total de paradas en la intersección es:

$$H(\lambda) = \sum_{j=1}^n h_j q_j = 0.95 \sum_{j=1}^n q_j * (1-\lambda_j) / (1-y_j) \quad (21)$$

Si se plantea el problema de optimizar la intersección en base al número de paradas de los vehículos, se debe minimizar la ecuación (21), sujeta a las restricciones (14, 15, 16 y 17).

Esta función objetivo es convexa, luego se puede obtener utilizando un algoritmo lineal estándar : simplex.

#### 4.5 Consumo de Combustible: Modelo Elemental

Lo más usual es que el ingeniero de tráfico no posea el perfil detallado de la trayectoria de un vehículo. En muchos estudios sólo posee la siguiente información: tiempo total de viaje, demora y número de paradas.

En estas circunstancias se requiere de un modelo de consumo de combustible simple, que se conoce con el nombre de modelo elemental (Akcelik, 1983). Este modelo expresa el consumo como una función de tres elementos principales de la trayectoria: crucero-ralenti-maniobras de aceleración y deceleración. La formulación analítica del modelo elemental es:

$$f = f_1 X_s + f_2 D_s + f_3 H \quad (22)$$

en que:

$f$  = consumo combustible promedio (l/veh)

$X_s$  = distancia analizada (km)

$D_s$  = demora promedio por estar detenido (h/veh)

$H$  = tasa de paradas (No. promedio paradas/veh)

$f_1$  = tasa de consumo de combustible en crucero (l/veh-km)

$f_2$  = tasa de consumo de combustible en ralenti (l/veh-h)

$f_3$  = tasa de consumo de combustible por parada (l/par-veh)

Este modelo se basa en la suposición de que las tres variables son independientes y por lo tanto pueden agregarse para obtener el consumo total.

$f_1 X_s$  corresponde a la cantidad de combustible consumida si la longitud total de la sección bajo estudio se transitara a velocidad de crucero,  $V_c$ .

La velocidad de crucero es la velocidad promedio ininterrumpida del movimiento, para un nivel determinado de flujo y en las condiciones prevalecientes de rodado. No incluye demoras debidas al sistema de control de tráfico. Sin embargo, se consideran demoras debidas a interferencias intermedias (fricciones laterales) y debidas a efectos de otros vehículos (fricciones internas).

$f_2 D_s$  es el combustible consumido al estar el vehículo detenido por un elemento de control de tránsito. Con respecto a la medición del tiempo detenido, debe enfatizarse que la demora por parada es diferente a la demora promedio normalmente utilizada en muchos modelos de tráfico. El combustible consumido en este tiempo depende esencialmente de las revoluciones que tenga el motor en este estado (Akcelik, 1983).

$f_3 H$  corresponde al exceso de consumo de combustible asociado a las maniobras de aceleración y deceleración del vehículo. Los factores críticos para cuantificar este término son las velocidades máximas y mínimas utilizadas por el conductor en estas maniobras.

Si se considera la demora promedio ( $d$ ) y la tasa de paradas ( $h$ ), la demora promedio por estar efectivamente detenido es:

$$ds = d - h * dh \quad (23)$$

Hay que hacer notar que:  $ds$ ,  $d$  y  $h$  son valores promedios para todos los vehículos y  $dh$  se aplica sólo a los vehículos que paran.

Por lo tanto, si se desea considerar sólo las variables normalmente utilizadas en ingeniería de tráfico, demora promedio y tasa de paradas, se tiene:

$$f = f_1 X_s + f_2 d + f_3' h \quad (24)$$

en que  $f_3' = f_3 - f_2 dh$ , corresponde a la tasa de consumo de combustible ajustada para considerar la parada completa del vehículo.

El consumo de combustible total para un movimiento es:

$$F = f q = f_1 X_s q + f_2 d q + f_3' h q \quad (25)$$

$$= f_1 L + f_2 D + f_3' H \quad (26)$$

Se puede obtener consumo mínimo de combustible de todos los movimientos que cruzan la intersección, sumando sobre todos los movimientos que llegan a ella, minimizando esta expresión respetando las restricciones prácticas mencionadas.

Dado que se está analizando intersecciones semaforizadas aisladas, el primer término permanece constante al minimizar la función objetivo, luego no es relevante considerarlo. Los coeficientes  $f_2$  y  $f_3'$  se pueden obtener de las tablas de la SECTU (1982). El problema es:

$$\text{Min CC}(\ ) = \sum_{j=1}^n (f_2 d_j + f_3' h_j) * q_j \quad (27)$$

s.a. Ecs (14), (15), (16) y (17).

#### 4.6 Movimientos Compatibles

El propósito de los semáforos es regular el tiempo en que los movimientos que llegan a la intersección tengan derecho a vía. Dos movimientos son compatibles si pueden cruzar la intersección en forma simultánea. Básicamente consideraciones de seguridad, de evitar movimientos conflictivos, determinan la compatibilidad de movimientos.

Con la intención de facilitar la labor del ingeniero de tráfico, se desarrolla un algoritmo que permite en base a una matriz de compatibilidad de movimientos generar un conjunto

de etapas y secuencia de éstas, factibles.

Existe una restricción práctica implícita en la secuencia de etapas: si un movimiento tiene derecho a vía en dos o más etapas, éstas deben ser consecutivas para evitar demoras y paradas innecesarias. Esta restricción está considerada en el algoritmo implementado a SIGSET modificado.

## 5.0 MODIFICACIONES GENERALES A SIGSET

Se desarrolló un programa computacional para no sólo determinar el ciclo óptimo de operación de semáforos en intersecciones semaforizadas aisladas, sino que además determinar los ciclos óptimos en base a minimizar el número de paradas y el consumo de combustible, respectivamente. Las nuevas funciones objetivos corresponden a las ecuaciones (21) y (27) desarrolladas en el capítulo anterior.

Este programa se basa principalmente en el trabajo desarrollado por Allscop (SIGSET y SIGCAP). A través de varias subrutinas se introducen las nuevas funciones objetivos a minimizar y la generación de secuencia de etapas factibles.

La entrada de datos no es compleja en el sentido de que es interactiva, pero requiere de una mayor cantidad de información que en el caso de SIGSET. Para poder evaluar el consumo de combustible, se requiere conocer para cada movimiento los flujos vehiculares segregados en vehículos particulares y locomoción colectiva, las velocidades de crucero y las tasas de consumo de combustible en ralenti. Las tasas de consumo por detenciones, las determina el programa a través de las velocidades de travesía, ya que tiene incorporada una subrutina que interpola en forma lineal entre los valores indicados para este efecto por la SECTU (1982).

Si se desea que el programa genere secuencias de etapas factibles, el usuario debe entregar una matriz de movimientos compatibles. Una vez generados, el usuario decide cuál o cuales le conviene analizar.

Para minimizar el consumo de combustible se utiliza el método de Frank-Wolfe. El programa encuentra una solución inicial factible similar a SIGSET. El diagrama de flujo del programa modificado se muestra esquemáticamente en la figura No. 2.

## 6.0 CONCLUSIONES

A través de un análisis de regresión aplicado a una muestra de movimientos semaforizados aislados tomada en la ciudad de Santiago, se obtiene una expresión para determinar la tasa de paradas. Esta expresión no sólo considera el factor uniforme, sino que está relacionada directamente con

el grado de saturación del movimiento:

$$h = 1,12 (1-\lambda)/(1-y) - 0,27 x$$

Se desarrollaron varios algoritmos que fueron incorporados al programa SIGSET para minimizar el número de paradas y el consumo de combustible de la intersección.

En las figuras 3 y 4 se muestra un ejemplo en el cual se minimiza en forma independiente el número de paradas y la demora. Como era de esperar estos óptimos no coinciden. Por lo tanto, para encontrar un óptimo que compatibilice estos conceptos, se recurre a un análisis de performance secundario: consumo de combustible.

Si se minimiza el consumo de combustible, se obtiene que el óptimo es un ciclo intermedio entre los ciclos que minimizan la demora y el número de paradas. Un factor determinante es la velocidad de crucero de los movimientos.

Dado que todavía estamos en la etapa de implementación del programa, se postula que minimizar el número de paradas no entrega una solución adecuada al problema, y es preferible minimizar la demora total de los usuarios que llegan a la intersección.

Si se puede considerar el efecto conjunto de ambas expresiones a través del consumo de combustible, evaluando en forma simultánea los costos sociales de la demora de los usuarios y del costo de combustible.

#### REFERENCIAS

- AKCELIK,R.(1981) Fuel efficiency and other objectives in traffic system management. Traffic Engineering and Control, Vol.13
- AKCELIK,R.(1981) Traffic signals: capacity and timing analysis. Research Report ARRB № 123.
- AKCELIK,R.(1983) Progress in fuel consumption modelling for urban traffic management. Research Report ARRB № 124.
- AKCELIK,R.(1987) Introduction to SIDRA-2 for signal design: 13th ARRB conference workshop papers and discussions. Research Report ARRB № 148.
- ALLSOP,R.E.(1975) Computer program SIGCAP for assessing the traffic capacity of signal controlled road junction description and manual for users. Transport Operations Research Group, Working Paper N°11, University of Newcastle upon Tyne.

ALLSOP,R.E.(1981) Computer program SIGSET for calculating delay-minimizing traffic signal timings-description and manual for users. Research Report University College, London.

BURROW,I.J. y WILLOUGHBEY,P.J.(1985) OSCADY: a computer program to aid the design of isolated signal junctions. PTPC Highway Appraisal and Design Seminar, University of Sussex.

MAY,A.D.Jr.(1965) Traffic flow theory-the traffic engineer's challenge. Proc. Inst. Traffic Eng.

McDONALD,M.J. y HOUNSELL,N.B.(1986) Traffic signal design and capacity. Actas IV Congreso Panamericano de Transporte.

ROAD RESEARCH LABORATORY (1963) A method of measuring saturation flow at traffic signals. Road Note 34, HMSO, London.

SAS User's Guide (1982) Statistical Analysis System. SAS Institute Inc., Cary, N.C. USA.

SECTU (1982) Metodología para la evaluación social de proyectos de inversión en vialidad urbana. Comisión de Transporte Urbano, Santiago.

WEBSTER,F.V.(1958) Traffic signals settings. Road Research Technical Paper No 39, HMSO, London.

WEBSTER,F.V. y COBBE, B.M.(1966) Traffic signals. Road Research Technical Paper No 56, HMSO, London.

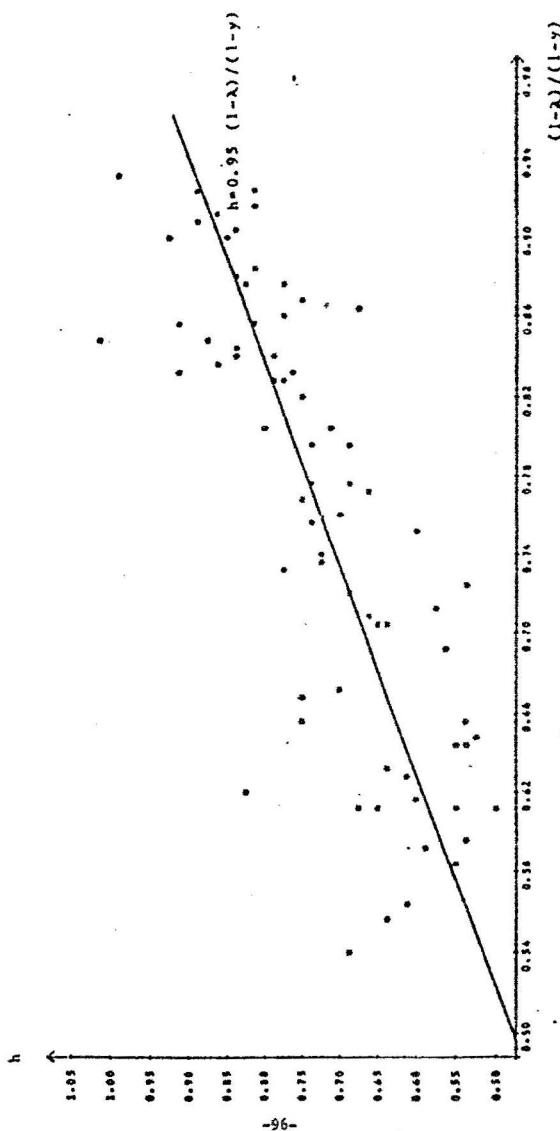


Figura No 1: Observaciones para calibrar modelo tasa de paradas.

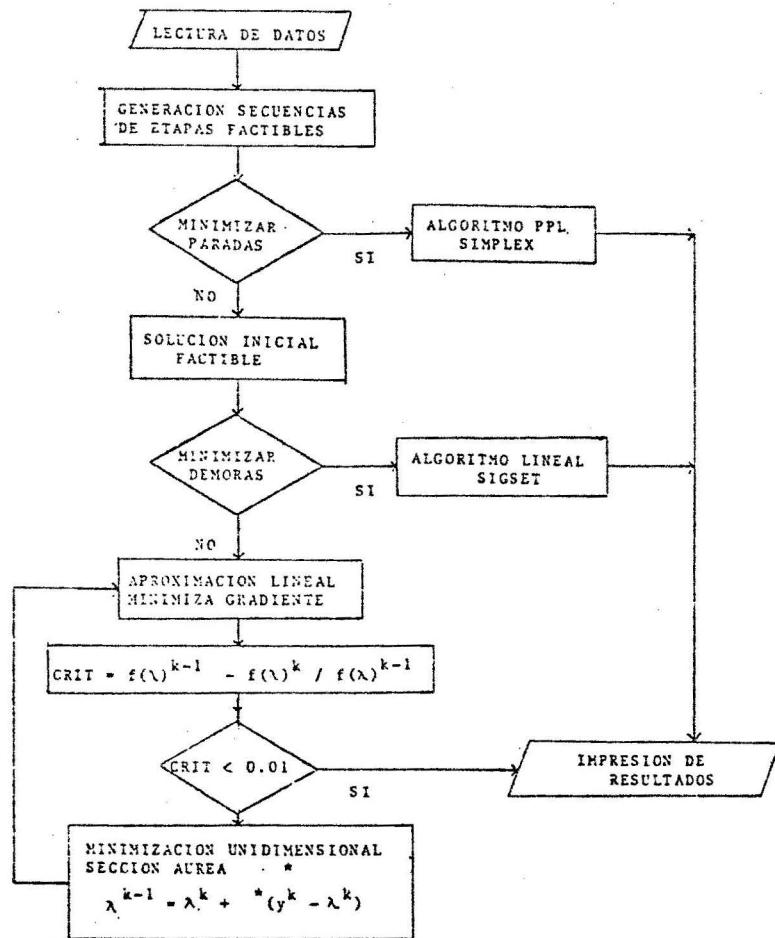
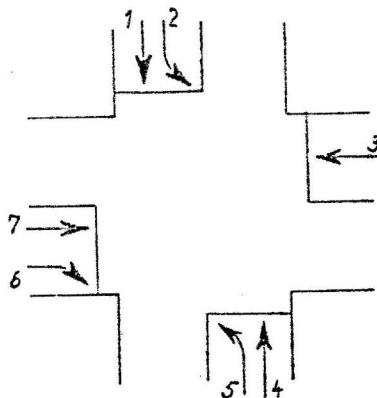


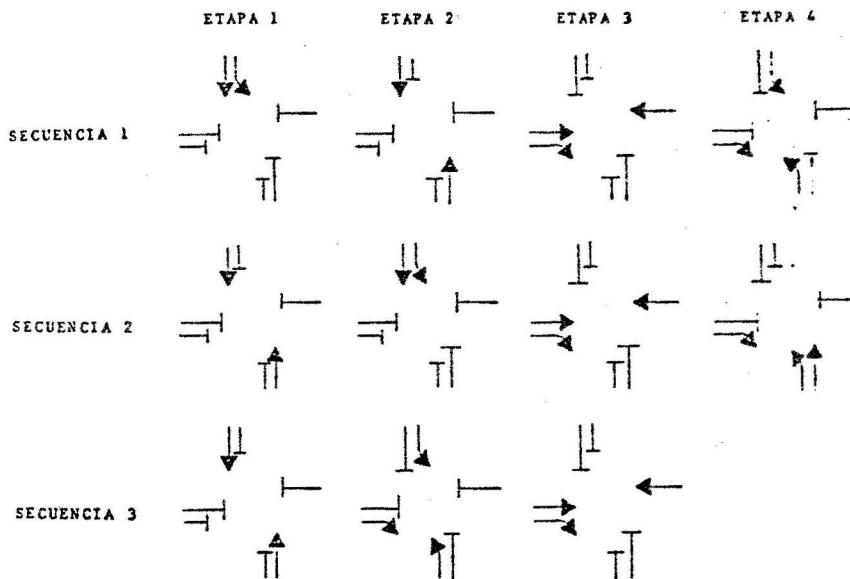
Figura 2. ESQUEMA DIAGRAMA DE FLUJO  
-97-



1. Movimientos intersección estudiada

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

2. Matriz de compatibilidad



3. Algunas secuencias generadas por el programa.

Figura 3. INTERSECCION ESTUDIADA

Minimización demora

Secuencia	Demora (h/h)
1	13.30
2	12.25
3	14.28
4	12.68
5	11.90*

$$\Rightarrow C = 56 \text{ (seg)} \\ N = 1686 \text{ (par/h)} \\ CC = 43.4 \text{ (lts/h)} \\ CS = \$ 5691$$

Minimización número de paradas

Secuencia	Nº paradas (par/h)
1	1596
2	1629
3	1605
4	1548*
5	1582

$$\Rightarrow C = 120 \text{ (seg)} \\ D = 27.3 \text{ (h/h)} \\ CC = 64.6 \text{ (lts/h)} \\ CS = \$ 9909$$

Minimización consumo de combustible

Secuencia	Cons.Comb.(lts/h)
1	43.90
2	42.60*
3	44.42
4	42.97
5	43.13

$$\Rightarrow C = 54 \text{ (seg)} \\ N = 1663 \text{ (par/h)} \\ D = 12.3 \text{ (h/h)} \\ CS = \$ 5679$$

Ciclo y reparto de verdes para secuencia 2

	Minimizar Demora	Minimizar Nº paradas	Minimizar Cons.Comb.
Ciclo(seg)	66	120	54
1	0.14	0.44	0.13
2	0.11	0.06	0.13
3	0.16	0.12	0.14
4	0.27	0.21	0.20

FIGURA N° 4: Resultados parciales intersección estudiada.