

## METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DEL TIEMPO DE CICLO OPTIMO EN REDES DE SEMAFOROS

Raúl Barrientos Ruiz, Daniel Fernández Koprich  
Secretaría Ejecutiva, Comisión de Transporte Urbano  
Ahumada 48 of. 527, Santiago, Chile. TLX 341400 Odepla-CK

Jaime Gibson Aldunate  
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile  
Blanco Encalada 2120, 4º Piso, Santiago, Chile

### RESUMEN

La determinación del tiempo de ciclo óptimo para una red de semáforos coordinados, es un problema para el que no se dispone aún de una formulación analítica. En el presente trabajo se desarrolla un método heurístico que tiene mejores propiedades que otros métodos análogos, el cual considera la simultaneidad de la elección de tiempo de ciclo para la red y la decisión de hacer funcionar algunos nodos en doble ciclo o fases duplicadas.

En primer lugar, se analiza el procedimiento de optimización incorporado en TRANSYT, el que presenta imperfecciones en la búsqueda del óptimo. Dicha observación es analizada y se plantea un procedimiento sencillo para superarla.

A continuación, abordando el tema de elección de ciclo, son comentados los métodos que han sido más utilizados en el país: el propuesto por Gibson, Saavedra y Spoerer (1982) y el incorporado en el programa TRANSYT. Para cuatro redes (tres arteriales y una bidimensional) se compara el tiempo de ciclo y la estructura de nodos en ciclo simple o doble que recomiendan esos métodos en relación con los resultados de un proceso de búsqueda exhaustiva del óptimo. Ninguno de ellos logra conducir sistemáticamente al óptimo. Aprovechando el enfoque del primer método y la información que provee el segundo, se propone un nuevo método. La solución que este produce no es, en general, única, pero en todos los ejemplos estudiados contiene al óptimo.

Se concluye que dependiendo de cual sea la finalidad del análisis de la red y de las características de ésta, existirán distintos criterios de aplicación del método propuesto.

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 Generalidades**

Cuando debe definirse el ciclo de semáforos a adoptar en una red o eje, los métodos tradicionales analizan las intersecciones como si éstas fueran aisladas, dejando de lado los efectos producidos por la coordinación.

Probablemente, habrá casos en los que el ciclo adoptado con un criterio de minimización de demoras en intersecciones, como si éstas fueran aisladas, permitirá generar unos desfases apropiados para la red, pero ciertamente habrá otros en que las demoras ocasionadas por detenciones serán importantes debido a que la coordinación no ha resultado adecuada.

En efecto, existirán conjuntos (ciclo-velocidad-longitud de arco) que generarán coordinaciones apropiadas, pero considerando que la velocidad es relativamente fija y la longitud un parámetro geométrico, la elección del ciclo será la que condicionará la eficiencia de los desfases resultantes.

Estas consideraciones se verifican al observar que es factible encontrar un tiempo de ciclo con una estructura de desfases y ciclos dobles alternativa a la dada por TRANSYT, que reporta menores Indices de Rendimiento. En efecto, en este estudio se encontró, por ejemplo, para el Eje Radial Vicuña Mackenna, un ciclo alternativo al dado por TRANSYT que mejora el Indice de Rendimiento en un 9.5 %.

### **1.2 Objetivos perseguidos**

Para enfocar este estudio, se han definido fundamentalmente los siguientes objetivos:

- a.- Revisar el proceso de optimización de desfases y repartos incorporado en TRANSYT.
- b.- Revisar las metodologías existentes para la determinación de tiempos de ciclo en redes de semáforos.
- c.- Obtener algunas relaciones o recomendaciones de carácter empírico que permitan incorporar a la determinación del ciclo de la red los beneficios derivados de una adecuada coordinación de redes de semáforos.

### **1.3 Base de datos**

Para poder cumplir con los objetivos anteriores se eligieron tres Ejes Radiales (Independencia, Matucana y Vicuña Mackenna) y una Red no Lineal (Costanera, definida por los ejes Bellavista, Pío Nono, José María Caro y Patronato),

analizándose en los cuatro casos el periodo punta mañana. Los Ejes están compuestos por 6 nodos semaforizados y la Red no Lineal por 13 nodos semaforizados.

## 2. ANALISIS DEL PROCESO DE OPTIMIZACION DE DESFASES Y REPARTOS INCORPORADO EN TRANSYT

La experiencia de diversos usuarios del programa TRANSYT ha llevado a la observación de que es factible encontrar resultados alternativos a los dados por el programa (en forma automática) que reportan mejores índices finales.

Esta observación lleva a la necesidad que, previo al análisis de elección de ciclo, deben superarse las eventuales deficiencias que presenta el proceso de optimización incorporado en TRANSYT.

Para este efecto, se realiza un análisis riguroso de dicho proceso, mediante la realización de dos tareas: la optimización de sólo desfases y la optimización de desfases y repartos.

### 2.1 El proceso de optimización incorporado en TRANSYT

El proceso de optimización de desfases y repartos de TRANSYT es controlado por la variable Indice de Rendimiento, la cual evalúa económicamente (cuando se imponen los ponderadores correspondientes), para un ciclo y configuración de ciclos dobles y simples, una estructura de desfases y repartos.

El proceso de minimización del Indice de Rendimiento es realizado en TRANSYT por la subrutina HILLCL (Hill-Climbing), la cual, básicamente, consiste en ejecutar una secuencia de búsqueda iterativa que define una programación de señales que minimiza, en un cierto rango de búsqueda, el Indice de Rendimiento (Robertson, 1969).

### 2.2 Optimización de sólo desfases

Inicialmente, se realizó un análisis global que permitiera descubrir que factores son determinantes en la optimización de desfases y que influencia pudieran tener frente a la posibilidad de querer mejorar los resultados arrojados por TRANSYT. Dicho análisis se concentró en dos actividades: primero, estudiar la posibilidad de encontrar una secuencia de búsqueda de optimización (definida en HILLCL) alternativa a la utilizada por TRANSYT, que reporte mejores resultados, y segundo, la utilización de desfases iniciales en dicha optimización.

Los resultados de este análisis preliminar, permitieron detectar que la imposición de desfases iniciales acertados resultaba ampliamente más efectiva que el uso de secuencias alternativas de búsqueda (Barrientos, 1988).

En esta perspectiva, se realizó una comparación rigurosa entre dos situaciones: una que asume una imposición de desfases iniciales nulos y una segunda que considera una imposición de desfases iniciales no nulos definidos como se indicará posteriormente. Ambas situaciones se analizan en un rango del tiempo de ciclo definido por el mínimo tiempo de ciclo para la red y 120 seg.

Los desfases iniciales impuestos para abordar la segunda situación fueron definidos de la siguiente forma: dado que para una red se barre un amplio rango de tiempos de ciclo, para el ciclo i-ésimo los desfases iniciales estarán dados por los desfases finales encontrados para el ciclo i-1, teniendo presente que se toman ciclos cada 4 seg. en el rango de estudio.

La figura N° 1 permite verificar el hecho que la imposición de desfases iniciales logra descubrir resultados que TRANSYT (en forma automática) no logra encontrar. Similares resultados se encontraron para el resto de los ejes y red analizados.

Así también, se observa que las curvas con imposición de desfases iniciales están constituidas por un conjunto de curvas convexas enlazadas, generando de esta forma una serie de mínimos locales.

Las diferencias máximas entre los Indices de Rendimiento bajo una situación con y sin desfases iniciales, para los ejes y red analizados, quedan resumidas en la Tabla N° 1. Cabe recalcar que los ciclos correspondientes a dicha situación no necesariamente deben coincidir con el ciclo óptimo de la red, esto es, aquel que minimiza el Indice de Rendimiento.

TABLA N° 1

Máximas mejoras encontradas producto de considerar desfases iniciales en la optimización de desfases.

RED O EJE	Ciclo(1)	IR (2)	IR (3)	Disminución porcentual del IR %
	seg	um/ut	um/ut	
INDEPENDENCIA	102	322,1	292,9	9,1
MATUCANA	92	238,5	228,8	4,1
VICUÑA MACKENNA	60	668,8	640,9	4,2
COSTANERA	82	917,3	857,4	6,5

(1) = Ciclo donde se produce el mayor beneficio.

(2) = Sin desfases iniciales.

(3) = Con desfases iniciales.

Así, se logra encontrar una disminución máxima de un 9,1% en el Indice de Rendimiento, valor que podría, eventualmente, implicar una variación importante en el valor de los beneficios asociados a un cierto proyecto en particular.

### 2.3 Optimización de desfases y repartos, considerando la posibilidad de utilizar dobles verdes

La optimización de repartos, que cuando se decide incorporar, opera dependientemente de la de desfases, se concreta incluyendo incrementos unitarios (en segundos) negativos en la secuencia de optimización (Robertson, 1969).

Por tanto, el análisis que se realiza resulta complementario al que se hiciera de optimización de sólo desfases. De este modo, el presente análisis se traduce en estudiar los mejoramientos adicionales que se pueden obtener producto de la flexibilización de los repartos. En este contexto, se consideró el uso de doble verde, el que consiste en asignar a un determinado movimiento el derecho a vía durante 2 periodos de verde distintos dentro de un mismo ciclo. Más aún, se consideró, para nodos de tres fases, repetir sólo aquella fase que presentara un mayor factor de carga ( $q_i/S_i$ , donde  $q_i$  y  $S_i$  son el flujo y el flujo de saturación del movimiento  $i$ -ésimo, respectivamente).

Bajo esta situación se procedió a optimizar desfases y repartos con el programa TRANSYT, situación que en adelante denominaremos "optimización completa". Obviamente, dicho proceso tuvo presente las conclusiones obtenidas en el punto anterior.

Mediante este análisis, se pretende detectar los mejoramientos aportados por la optimización completa sobre la optimización de sólo desfases.

Dicha comparación permitió detectar que sistemáticamente, en todos los casos estudiados, el Indice de Rendimiento obtenido es inferior al dado por la optimización de sólo desfases, para tiempos de ciclo altos (aproximadamente sobre 100 seg.). Sin embargo, las mejoras detectadas en los distintos ejes para tiempos de ciclo altos provienen de distintas fuentes. En efecto, debe tenerse presente que cuando se realiza una optimización de desfases y repartos, existe una gran cantidad de combinaciones posibles entre las variables que definen el indicador global de optimización, es decir, el Indice de Rendimiento.

Básicamente, son tres las variables que definen el Indice de Rendimiento, a saber: la Demora Uniforme, la Demora Aleatoria y por Sobresaturación y las Detenciones. Por otro lado, las combinaciones que resulten de estas variables

dependerán de los ponderadores de detenciones y demoras con que se efectúe el proceso de optimización y de los patrones de flujos de los distintos movimientos involucrados.

Así por ejemplo, si revisamos solamente la Demora Uniforme, podremos ver que los únicos casos que presentaron una mejoría (en el rango definido anteriormente) en términos de coordinación son Vicuña Mackenna y Costanera. En el resto de los casos no se detectaron mejoras en términos de coordinación (gráficos y mayores antecedentes pueden ser vistos en Barrientos (1988)).

Finalmente, es posible realizar análisis similares a este último, tomando en cuenta otras variables que intervienen en el proceso de optimización, lo que en definitiva indica que para la utilización de esta técnica de dobles verdes, en un caso en particular, será necesario realizar un análisis riguroso de todos los factores involucrados.

### 3. ANALISIS DE LOS METODOS USUALES DE ELECCION DE CICLO

Una vez superadas las deficiencias del proceso de optimización incorporado en TRANSYT se puede enfocar el problema de elección de ciclo, para lo cual se inicia el análisis con una descripción de los métodos existentes para dicha tarea.

Si se requiere encontrar un tiempo de ciclo para una red de semáforos coordinada, dada una función objetivo (como por ejemplo minimización de demoras en la red), actualmente no se dispone de una metodología rigurosa que permita cumplir con este objetivo. Usualmente se utilizan dos métodos que permiten abordar dicho propósito. Estos son :

- i) Elección automática del tiempo de ciclo realizada por TRANSYT. Este primer método corresponde a una opción incorporada al programa computacional TRANSYT para seleccionar u orientar al usuario en la determinación del tiempo de ciclo óptimo para una red coordinada. Este proceso automatizado de elección entrega una solución única, la que es utilizada frecuentemente por los usuarios del modelo directamente, olvidando los supuestos en que ella se basa. Una descripción detallada de este proceso se puede encontrar en Robertson (1969).

Dicha opción se encuentra incorporada en la versión N°8 del programa mencionado y en adelante se entenderá, por lo tanto, que cuando se indique "TRANSYT" se hace referencia a dicha versión.

- ii) Método propuesto por Gibson, Saavedra y Spoerer (1982). Este método corresponde a la forma de seleccionar el tiempo de ciclo desarrollado en la "Metodología para la

programación de redes de semáforos de tiempos prefijados" elaborada por los autores ya indicados. Básicamente, el método utiliza la propiedad de intersecciones aisladas que dice relación con que la demora usualmente varía menos de un 20 % en el rango  $0.75 C_o - 1.5 C_o$ , con  $C_o$  = ciclo óptimo individual (Webster, 1966) y así define como criterio que el ciclo común sea tal que pertenezca a dicho intervalo para cada cruce individual. El método asume una partición inicial de aquellos ciclos que deben quedar en ciclo doble, por tanto, se trata de un proceso manual que arroja un set de soluciones factibles por cada combinación de ciclos dobles y simples. La solución final estará dada por aquel grupo de ciclos, de entre los factibles, que reporte un menor Indice de Rendimiento al ser optimizado con TRANSYT. Una descripción detallada de este procedimiento se puede encontrar en Gibson (1982).

Ambos métodos se basan en un análisis que considera las intersecciones como aisladas, y son utilizados para encontrar el tiempo de ciclo de la red como también los nodos que quedarían en ciclo doble.

### 3.1 Evaluación de los Métodos

Con la finalidad de efectuar una comparación entre ambos métodos se realiza, en primer lugar, una búsqueda exhaustiva del tiempo de ciclo, y posteriormente, se lleva a cabo un análisis de los resultados de los métodos a la luz de los ciclos óptimos encontrados por el proceso de la búsqueda exhaustiva.

#### 3.1.1 Búsqueda exhaustiva del tiempo de ciclo

La búsqueda se lleva a cabo mediante un barrido exhaustivo del tiempo de ciclo (cada 2 seg), decidiendo la configuración de ciclos dobles y simples por el criterio establecido en el método de Gibson, Saavedra y Spoerer (1982).

La figura N° 2 muestra este criterio, en donde para cada intersección se ha trazado en línea continua el rango del tiempo de ciclo en que el nodo funcionaría en ciclo simple y en línea segmentada el correspondiente a ciclo doble. Los rangos quedan definidos por  $(\alpha C_{oi}, \beta C_{oi})$ , con  $C_{oi}$  = ciclo óptimo de la intersección i-ésima. De esta forma, para un ciclo i-ésimo es posible determinar que nodos quedan en ciclo doble y cuales en simple.

Teniendo presente que los ciclos óptimos por nodo fueron dados por TRANSYT (considerando intersecciones aisladas), se realizó una búsqueda inicial con  $\alpha = 0.75$  y  $\beta = 1.5$ . Bajo esta situación se pudo constatar que se producían sobresaturaciones en determinados nodos para algunos ciclos

dentro del rango establecido, ya sea en su parte inferior (definido por  $\alpha C_{oi}$ ) o superior (definido por  $\beta C_{oi}$ ). Se pudo verificar que esto se debía a que el ciclo óptimo individual dado por TRANSYT no se calcula, sino que se elige de un grupo de valores predefinidos. De este modo, como el valor elegido para  $C_{oi}$  es una aproximación, no se puede garantizar que dentro del rango  $0.75 C_{oi} - 1.5 C_{oi}$ , la demora no varia más allá de un 20 %. Bajo esta circunstancia se tuvo que modificar los valores de  $\alpha$  y/o de  $\beta$  para los nodos que presentaban este problema.

Finalmente, los tiempos de ciclo óptimos para cada red, dados por este proceso de búsqueda exhaustiva del tiempo de ciclo, son los que figuran en la tabla N° 2.

### 3.1.2. Análisis de los métodos utilizados a la luz de los óptimos encontrados por la búsqueda exhaustiva del tiempo de ciclo

Los resultados obtenidos con cada uno de los métodos descritos son analizados a continuación a la luz de los resultados dados por la búsqueda exhaustiva.

#### a) Método de elección automática del tiempo de ciclo

La tabla N° 2 muestra los resultados encontrados por la elección automática de ciclo realizada por TRANSYT junto a los arrojados por la búsqueda exhaustiva.

TABLA N° 2  
Resultados dados por el método de elección automática de tiempo de ciclo a la luz de los óptimos arrojados por una búsqueda exhaustiva.

Red o Eje	Elección automática del programa TRANSYT.			Resultados obtenidos por una búsqueda exhaustiva.			Dismi- nución del IR (%)
	ciclo [seg]	IR [um/ut]	Nodos en ciclo doble	ciclo [seg]	IR [um/ut]	Nodos en ciclo doble	
INDEPENDENCIA	70	261,5	5 y 41	70	261,5	5 y 41	0,0
MATUCANA	90	236,1	1,3 y 4	88	222,7	1 y 4	5,7
VICUÑA MACKENNA	120	483,4	2,3 y 6	104	472,8	2,3 y 6	2,2
COSTANERA	120	968,2	58,61,64,65 67,68,70,71 72 y 73.	88	920,1	64,67,68,70 71,72 y 73.	5,0

La comparación muestra que los ciclos óptimos encontrados con el método de elección automática de ciclo llegan a tener hasta 40 seg. de diferencia con respecto al encontrado por el proceso de búsqueda exhaustiva, lo que lleva a una diferencia en Indice de Rendimiento de hasta un 6 %. Cabe destacar que las diferencias encontradas poseen características distintas

dependiendo del tipo de red que se trate. Así, por ejemplo, para los ejes radiales se pudo detectar que las mejoras obtenidas por búsqueda exhaustiva provienen de un análisis fino del tiempo de ciclo, más que de un ciclo distinto con una estructura de desfases alternativa, como resultó en el caso de la red Costanera.

b) **Método propuesto por Gibson, Saavedra y Spoerer (1982)**

Tomando como referencia las soluciones dadas por la búsqueda exhaustiva, se pudo verificar que estas soluciones (compuestas de un tiempo de ciclo y la configuración de ciclos dobles y simples asociada) están contempladas en el set de soluciones factibles dadas por este método. Esto indica que dicho método logra encontrar la solución óptima, pero dentro de un amplio set de soluciones factibles, lo que hace necesario repetir una serie de optimizaciones que permitan detectar aquella solución que entrega un menor Indice de Rendimiento, lo que en definitiva se traduce en un alto consumo de recursos humanos y computacionales.

**3.4 Planteamiento de un método de búsqueda del tiempo de ciclo óptimo con la configuración de ciclos simples y dobles asociada**

En la perspectiva de superar las deficiencias mostradas por los métodos anteriores, a continuación se propone un método que supera dichas inconveniencias. El método comprende dos facetas: determinar el ciclo común en la red y, a la vez, que nodos de ella quedan en ciclo simple y ciclo doble.

Para la aplicación de este método, es necesario simular la red con TRANSYT, con la opción que entrega información sobre el tiempo de ciclo. De la Tabla que entrega el Indice de Rendimiento para cada nodo  $i$  ( $IR_i$ ) bajo diversos ciclos, se toman los valores :

$$C_{oi}^* = \text{tiempo de ciclo que minimiza } IR_i \\ IR_i^* = \text{valor de } IR_i \text{ para } C_{oi}^*$$

No se consideran los nodos de frontera. Para los demás nodos, se define un intervalo  $[CI_i ; CS_i]$  cuyos límites están dados por :

$$CI_i = \max. \{0.8 C_{oi}^*, C'^*_i, 40 \text{ seg.}\} \\ CS_i = \min. \{1.5 C_{oi}^*, C''_i, 120 \text{ seg.}\}$$

donde  $C'_i$  y  $C''_i$ , son, respectivamente, el mínimo y el máximo tiempo de ciclo para el nodo  $i$  en que el valor de  $IR_i$  no supera en más de 10 % a  $IR_i^*$ . Como la tabla entrega valores para ciertos tiempos de ciclo y no en forma continua, hay que interpolar si para dos ciclos consecutivos uno cumple la condición y el otro no. A continuación, se define una partición del conjunto de nodos en dos subconjuntos. El primero ( $I_1$ )

agrupa los nodos que pueden formar un intervalo no vacío dado por :

$$N_1 = [\max CI_i ; \min CS_i] \quad i \in I_1$$

Es posible que varios subconjuntos  $I_1$  satisfagan esta condición. Para cada uno, se forma otro subconjunto  $I_2$  con el resto de los nodos y se ve si en  $I_2$  se puede generar un intervalo no vacío dado por :

$$N_2 = [2 \max CI_i, 2 \min CS_i] \quad i \in I_2$$

Si no se cumple esta condición o resulta que  $N_1 \cap N_2 = \emptyset$ , se descarta esa partición. Son soluciones factibles las que satisfacen todas las condiciones. Su interpretación práctica es: el tiempo de ciclo común es un número par perteneciente al intervalo  $N_1 \cap N_2$ ; los nodos de  $I_1$  quedan en ciclo simple y los de  $I_2$  en ciclo doble.

Un resultado de la aplicación de esta metodología se puede encontrar en el capítulo 5. Los detalles de éste y otros ejemplos pueden verse en Barrientos (1988).

#### 4. CRITERIOS PARA LA DETERMINACION DEL TIEMPO DE CICLO EN REDES DE SEMAFOROS

La aplicación del método recién desarrollado estará sujeta al tipo de proyecto que se esté analizando. Así, por ejemplo, si se trata de una evaluación de proyecto de vialidad urbana, no convendrá realizar un análisis acabado del tiempo de ciclo; sin embargo, si es un proyecto de gestión de tránsito, cuyos resultados serán colocados directamente en terreno, se recomendará agotar las posibilidades de encontrar un tiempo de ciclo (y su configuración de ciclos dobles y simples) alternativo al dado por TRANSYT en forma automática.

En este contexto, se estructura una recomendación orientada a la elección de ciclo dependiendo del proyecto que se trate.

La tabla N° 4 indica los criterios que deben adoptarse para la elección del tiempo de ciclo y para la optimización de desfases y repartos.

TABLA N° 3  
Criterios de elección del tiempo de ciclo y optimización de desfases y repartos.

TIPO DE PROYECTO	CRITERIO DE ELECCION DEL TIEMPO DE CICLO.		CRITERIOS PARA LA OPTIMIZACION DE DESFASES Y REPARTOS.	
	EJES RADIALES	REDES NO LINEALES	EJES RADIALES	REDES NO LINEALES
Ev. de Proyectos de Vialidad Urbana.	Elección automática del tiempo de ciclo que realiza TRANSYT	Método recomendado: se elige a lo más 1 ciclo de cada rango de solución factible.	Se repite la optimización de desfases (y repartos), considerando como desfases iniciales los encontrados en una optimización previa.	Para cada ciclo seleccionado se optimiza 2 veces. Primero con desfases iniciales nulos y luego con desfases iniciales dados por los encontrados previamente.
Proyectos de Gestión de Tránsito.	Método recomendado, analizando rigurosamente cada uno de los rangos de solución factible. Se recomienda el uso de doble verde solo si el análisis particular así lo recomienda.	Dentro de cada rango de solución factible debe considerarse la imposición de desfases iniciales en forma secuencial.		

## 5. APLICACION DE LA METODOLOGIA DESCrita

La tabla N° 4 resume los resultados de una aplicación de la metodología descrita en el eje Vicuña Mackenna, analizado como un proyecto de gestión de tránsito. Note se las diferencias de los resultados encontrados por la elección automática de ciclo hecha por TRANSYT de aquella obtenida por el método aquí recomendado para la elección de ciclo. Posteriormente, las diferencias aumentan por efecto del uso de dobles verdes.

Se puede apreciar que se logra una reducción máxima de un 9,6 % en términos de Indice de Rendimiento entre los 2 métodos considerados, utilizando dobles verde en el método recomendado de elección de ciclo.

Por otro lado, si realizamos una comparación en términos económicos a partir de las programaciones encontradas y consideramos los siguientes supuestos:

- tasa de ocupación para automóviles = 1.5 pax/veq
- tasa de ocupación para buses = 15 pax/veq
- valor del tiempo = 100 \$/hr-pax
- consumo por detención de automóviles = 1 lt/100 det
- consumo por detención de buses = 2 lt/100 det
- costo social de combustible para automóviles = 45 \$/lt
- costo social de combustible para buses = 48 \$/lt
- 8 hrs. diarias y 6 días a la semana,

se tendrá como resultado un beneficio anual de \$ 25.553.664, como producto de la determinación de una programación más cercana al óptimo.

TABLA N° 4  
Resumen de los resultados encontrados por los distintos  
Métodos para el eje Vicuña Mackenna.

	Tiempo de Ciclo	Índice de Rendimiento	Nodos en ciclo doble
	(seg)	(UM/UT)	
Elección automática de TRANSYT	120	483,4	2,3 y 6
Método recomendado de elección ciclo	104	472,8	2,3 y 6
	104	437,0	2,3 y 6(*)

(\*) = Modo 6 (de 3 fases) es dejado con 4 fases; se le repite la fase con mayor factor de carga.

## 6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo pueden presentarse desde dos puntos de vista :

### a) Proceso de Optimización incorporado en TRANSYT

Queda de manifiesto que el proceso de optimización de desfases incorporado en TRANSYT es sensible al punto de partida, llegándose a encontrar variaciones de hasta un 9% en el Índice de Rendimiento entre una situación sin desfases iniciales y otra con ellos. A la vez, esta última situación lleva a obtener una curva Índice de Rendimiento versus tiempo de ciclo claramente definida en la que han desaparecido los cambios bruscos de tendencia (los que se originaban debido a que el proceso de optimización conduce en algunos casos a la obtención de óptimos locales no detectando la solución más conveniente).

Respecto a la optimización de repartos, se puede recomendar el uso de dobles verdes para tiempos de ciclos mayores a 100 seg. (aproximadamente). Sin embargo, su uso estará restringido al análisis particular correspondiente a cada caso.

### b) Elección del tiempo de ciclo

El método recomendado de elección de ciclo entrega una solución simultánea de tiempo de ciclo y nodos de la red que quedan en ciclo simple y doble. El método no asegura unicidad de la solución ni que ésta corresponda a un óptimo global, pero en las aplicaciones realizadas ha mostrado un

buen comportamiento. Además, es sencillo de ejecutar y logra detectar las soluciones que TRANSYT no advirtió, como también, restringe el set de soluciones factibles arrojadas por el método de Gibson, Saavedra y Spoerer (1982).

Finalmente, hay que destacar el hecho que las recomendaciones entregadas para superar las deficiencias de TRANSYT, en relación con su proceso de optimización, pueden ser reemplazadas por un proceso alternativo a hill-climb. Dicha actividad, sin lugar a dudas, pertenece a una linea de investigación indispensable en ingeniería de tránsito, dada la necesidad de contar con procesos eficientes de optimización que permitan enfrentar con mayor rapidez y precisión las exigentes demandas que se generan, cada vez con mayor intensidad, en esta área de la ingeniería.

#### REFERENCIAS

ALLSOP, R. E. (1971). SIGSET: A computer program for calculating traffic signal settings. Traffic Engineering and Control, vol. 13.

AKCELIK, R. (1981) Traffic Signals : Capacity and Timing Analysis. Research Report ARR 123, Australian Road Research Board.

BARRIENTOS, R (1988) Análisis del tiempo de ciclo óptimo en redes de semáforos. Memoria de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

FOULDS, L. R. (1986) : Transyt Traffic Engineering program efficiency improvement via Fibonacci Search. Transportation Research - A, vol. 20 a N° 4, pp. 331-335, 1986.

GIBSON J., SAAVEDRA A. Y SPOERER J.P. (1982). Metodología para la programación de redes de semáforos de tiempos prefijados. Publicación ST-INV/01/82, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES (1982). Manual de Señalización de Tránsito.

ROBERTSON, D. I. (1969). TRANSYT : A traffic Network Study tool. Report LR 253, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

SECRETARIA EJECUTIVA DE LA COMISIÓN DE TRANSPORTE URBANO, (1983). Metodología para la Evaluación Social de Proyectos de Inversión en Vialidad Urbana.

WEBSTER F. Y COBBE (1966). Traffic Signals, Road Research Technical, paper N° 56, Road Research Laboratory, Ministry of Transport, U.K.

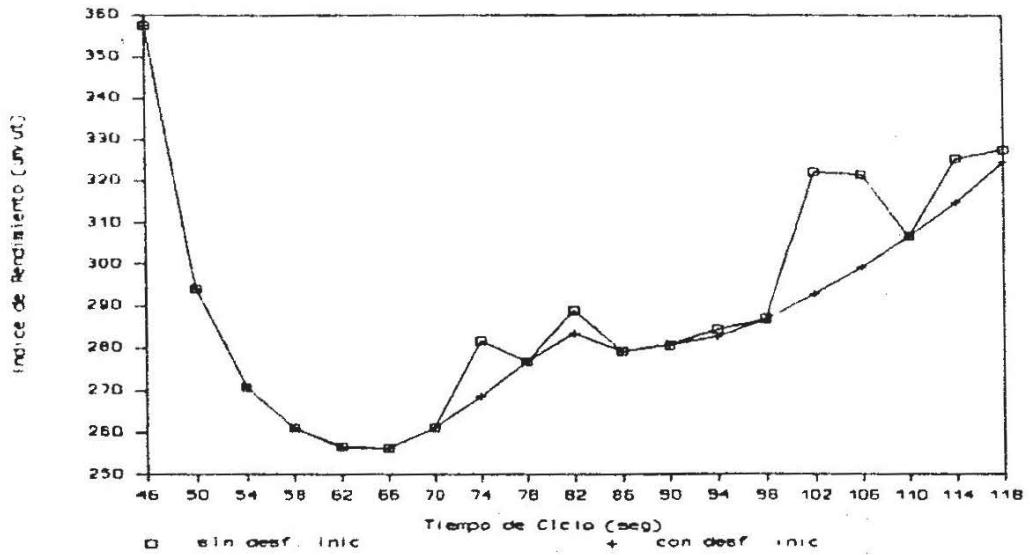


FIGURA N° 1 Indice de Rendimiento obtenido en la Optimización de sólo desfases (Eje Independencia).

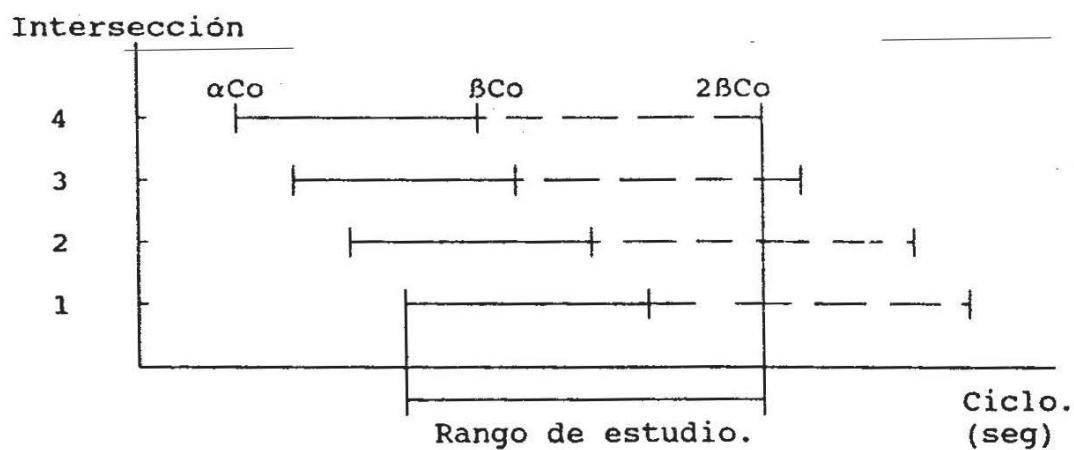


FIGURA N° 2 Descripción gráfica de la búsqueda exhaustiva del tiempo de ciclo.