

## CONSECUENCIAS PRACTICAS DE UN NUEVO MODELO DE DISPERSION DEL TRAFICO\*

Jaime Gibson  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Chile

### Resumen

Una reformulación, desarrollada por el autor, del modelo de dispersión de Robertson permite eliminar inconsistencias en la reproducción del tiempo medio de viaje y demuestra que su parámetro K es irrelevante.

La nueva fórmula ha sido introducida en dos de los programas computacionales más usados para gestión del tránsito: TRANSYT y SATURN. Este trabajo explica los cambios efectuados y presenta un análisis de sus consecuencias, basado en experimentos simulados.

Se prueba que, en ambos casos, hay una mejora en los resultados, destacando la ganancia en consistencia. Las diferencias que se producen con el nuevo modelo son mucho menores a nivel de red que de arco o nodo, por efectos compensatorios que se explican. Se prueba también que la programación óptima de semáforos coordinados se modifica en algunas situaciones, siendo mucho más sensible al modelo mismo que al valor de sus parámetros. Este puede ahora, en TRANSYT, ser especificado por el usuario. Los cambios en los programas computacionales son muy sencillos y no conllevan una variación perceptible de su tiempo de ejecución.

\* Esta investigación ha contado con financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Tecnológico, Proyecto 110-84.

## 1. Introducción

Para estudiar medidas de gestión del tránsito se ha hecho cada vez más necesario disponer de herramientas capaces de reproducir la circulación vehicular en redes de tamaño relativamente grande, como resultado de la conciencia de que dichas medidas provocan efectos significativos más allá de su lugar inmediato de aplicación. Así han surgido métodos computacionales como TRANSYT (Robertson, 1969; Vincent, Mitchell y Robertson, 1980) y SATURN (Bolland, Hall y Van Vliet, 1979). Ambos están basados en una lógica macroscópica de simulación del tráfico, mediante histogramas cíclicos de flujo (Robertson, 1974). En la generación de éstos, un modelo de dispersión del tráfico desempeña un rol crucial en la vinculación de procesos de salida y de llegada entre nodos adyacentes. Los dos programas hacen uso del modelo desarrollado por Robertson (1969), aunque el TRANSYT lo hace con más detalle.

El autor demostró (Gibson y Aguirre, 1984 a y b) que dicho modelo presenta una inconsistencia en su especificación y propuso una fórmula alternativa, muy similar computacionalmente, que resuelve este problema. Esta fórmula ha sido introducida en TRANSYT (versión 8) y SATURN, con el propósito de estudiar los cambios que se producen a nivel agregado (en redes) con respecto a la modelación original.

Los cambios afectan a los histogramas y, por lo tanto, a la demora uniforme y a las detenciones, que se calculan a partir de ellos. Es de esperar que aparezcan diferencias en la estimación de estas variables para una programación de semáforos dada, que es el caso relevante para el SATURN y para TRANSYT en su fase de simulación. También, que difieran las programaciones óptimas para una misma red, obtenidas mediante TRANSYT. Por otra parte, como el nuevo modelo no usa el parámetro K, su lugar en la actual entrada de datos del TRANSYT puede ser ocupado por los parámetros que verdaderamente influyen en la dispersión. Interesa entonces estudiar la sensibilidad de la simulación y optimización (en TRANSYT-8) ante estos parámetros.

Las modificaciones introducidas, y su origen conceptual, son descritas en el Capítulo 2 de este trabajo. El Capítulo 3 recoge los resultados relacionados con la simulación del tránsito, en tanto que los relativos a optimización están contenidos en el Capítulo 4. Las conclusiones se resumen en el Capítulo 5.

## 2. El Modelo Modificado

El modelo original de Robertson es de carácter recursivo, dado por:

$$q_2(i+T) = Fq_1(i) + (1-F) q_2(i+T-1) \quad (1)$$

donde:

$q_2(i+T)$  = flujo aguas abajo en el intervalo  $i+T$

$T$  = tiempo mínimo de viaje entre secciones 1 y 2, en intervalos; es un número entero

$q_1(i)$  = flujo aguas arriba en el intervalo  $i$

$F$  = factor de dispersión.

Para T y F, las expresiones usadas en TRANSYT-8, son:

a) Arcos de tráfico general:

$$T = \text{INT} [0,8 \bar{t} + 0,5] \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{1+KT} \quad (3)$$

donde:

$\bar{t}$  = tiempo medio de viaje entre secciones 1 y 2, en intervalos.

K = parámetro ( $0 \leq K \leq 1$ ) que puede ser especificado por el usuario para cada arco. Su valor por defecto es 0,35.

b) Arcos de buses (Robertson y Vincent, 1975):

$$T = \text{INT} [0,3 \overline{TP} + 0,85 \overline{TM}] \quad (4)$$

$$T = \overline{TP} + \overline{TM} \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{1+0,7 \overline{TP} + 0,15 \overline{TM}} \quad (6)$$

donde:

$\overline{TP}$  = tiempo medio de parada, en intervalos.

$\overline{TM}$  = tiempo medio en movimiento entre secciones 1 y 2, en intervalos.

En SATURN, no hay distinción de arcos y las expresiones son:

$$T = \text{INT} [0,8 \bar{t} + 0,5] \quad (7)$$

$$F = \frac{1}{1 + 0,4 T} \quad (8)$$

Si bien todas las fórmulas anteriores para F y T son muy parecidas, las pequeñas diferencias entre ellas (valores estándar o especificados por el usuario, distinción de buses) tienen consecuencias cuantitativamente nada despreciables, como se verá más adelante. Conviene hacer notar que las ecs. (2) a (8) fueron sacadas de las subrutinas correspondientes, ya que en el caso de los arcos de buses son distintas a las que se dan en el manual de uso del programa.

El modelo modificado mantiene la ec. (1) y usa una expresión para F que no depende del tipo de arco, que es:

$$F = \frac{1}{1 + \bar{t} - T} \quad (9)$$

Además, asume parametrizadas las expresiones para T, con una forma provisional:



$$T = \text{INT} [\beta \bar{t} + 0,5] , \text{ arcos de tráfico general} \quad (10)$$

y

$$T = \text{INT} [\sigma \overline{TP} + \delta \overline{TM} + 0,5] , \text{ arcos de buses} \quad (11)$$

donde  $\beta$ ,  $\delta$  y  $\sigma$  son parámetros. Nótese que el parámetro  $K$  desaparece.

La forma de las ecs. (10) y (11) está siendo investigada mediante un nuevo método de calibración del modelo de dispersión, desarrollado por el autor (Gibson, 1985). Los primeros resultados no permiten deducir conclusiones firmes aún pero indican que los valores de los parámetros  $\beta$ ,  $\delta$  y  $\sigma$  pueden ser diferentes, al menos en las calles estudiadas, de los incluidos en TRANSYT-8 y SATURN.

La justificación de la nueva expresión para  $F$  es que otorga consistencia al proceso de predicción de los histogramas. Este se hace mediante la ec. (1) que requiere un valor para  $F$ , el que a su vez necesita como dato  $\bar{t}$ . No obstante, este  $\bar{t}$  puede ser deducido del histograma predicho ( $q_2$ ) y del inicial ( $q_1$ ). Si hay consistencia, ambos valores deberían ser idénticos.

Se puede demostrar que si  $\bar{t}_p$  es el tiempo medio de viaje predicho (resultante de los histogramas) y  $\bar{t}$  el dato (usado para calcular  $F$ ), las expresiones de Robertson para arcos de tráfico general conducen a:

$$\bar{t}_p - \bar{t} = [(1+K)\beta - 1] \bar{t} - (1+K)r - \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{1+KT}\right)^{-n} - 1} \quad (12)$$

donde:

$n$  = número de intervalos en que se ha dividido el ciclo

$r$  = residuo que proviene de hacer  $\bar{t} = T+r$ , con  $r \in [-0,5; 0,5)$  y tal que  $\text{INT} [T+r+0,5] = T$ .

Los valores  $\beta = 0,8$  y  $K = 0,35$  del TRANSYT-8 significan una sobrepredicción ( $\bar{t}_p > \bar{t}$ ) que fluctúa entre 5 y 15%. SATURN supone un valor  $K = 0,4$ , por lo cual su sobrepredicción es aún mayor. Hay, pues, inconsistencia y es sesgada.

La expresión modificada (ec. 9), que es una aproximación a la exacta (Gibson y Aguirre, 1984) produce también una diferencia, cuyo monto es:

$$\bar{t}_p - \bar{t} = - \frac{n}{\left(1 - \frac{1}{1+\bar{t}-T}\right)^{-n} - 1} \quad (13)$$

En el mismo rango anterior, hay una subpredicción inferior al 0,1%. En términos prácticos, esta aproximación resuelve el problema de inconsistencia señalado.



En los arcos de buses en TRANSYT-8, la expresión de  $F$  (ec. 6) se parece mucho a la ec. (9), excepto por no introducir el carácter entero de  $T$ . La ec. (4), que determina  $T_2$  redondea por abajo. Como consecuencia, en este caso TRANSYT-8 subpredice ( $t_p < \bar{t}$ ) pero más acotadamente; entre 1 y 5%. La expresión modificada también subpredice, pero en menos de 1%,

En síntesis, la reproducción del tiempo medio de viaje mejora considerablemente con la modificación.

Es cierto que en TRANSYT-8 el valor de  $K$  puede ser especificado por el usuario para cada arco de tráfico general, y de la ec. (12) es evidente que puede encontrarse un  $K$  que anule la diferencia. Sin embargo, es absurdo tener un parámetro con estas características. El éxito de la fórmula modificada, que no lo incorpora, ratifica esta aseveración.

Al eliminar  $K$ , queda espacio disponible en la entrada de datos del TRANSYT-8. Esto permite, con una ligera modificación adicional del programa, que el usuario pueda especificar parámetros de  $T$ , que son los realmente influyentes en la dispersión, que son valores estándar en la versión original. Es ampliamente reconocido que no hay razón para esperar que sean constantes universales pero, de hecho, así habían sido tratados hasta ahora por la rigidez del programa.

Los cambios necesarios en los programas computacionales son muy sencillos y afectan a las subrutinas STOPUT y TINPUT (ésta, una instrucción) en TRANSYT-8 y a la subrutina PLDIS en SATURN.

Las versiones modificadas permiten:

- en SATURN, calcular  $F$  con la ec. (9);
- en TRANSYT-8, calcular  $F$  con la ec. (9), y especificar:
  - .  $\beta$  , en arcos de tráfico general
  - .  $\delta$  , en arcos de buses sin parada
  - .  $\sigma$  , en arcos de buses con parada.

Los valores estándar anteriores de estos parámetros se mantienen como valores por defecto.

Un listado en FORTRAN de los cambios puede obtenerse directamente del autor,

Ahora bien, el análisis precedente está basado en un proceso de predicción de histogramas (i.e. para un arco) y es evidente que la inconsistencia en la reproducción del tiempo medio de viaje está asociada a una deformación de los histogramas predichos. En palabras simples, TRANSYT-8 tiende a hacer llegar los vehículos más tarde a la intersección, en arcos de tráfico general, y más temprano, en arcos de buses. SATURN, que no hace distinción, tiende a retrasar las llegadas.

Para una programación del semáforo dada, las demoras y detenciones calculadas de los histogramas deben ser diferentes al levantar la inconsistencia.

También deben producirse diferencias en intersecciones no semaforizadas pues los patrones de llegada por las ramas principal y secundaria derivan de un proceso de dispersión,

Dichas variables deberían tener valores mayores en arcos de buses controlados por semáforo, con el nuevo modelo, porque éste predecirá sus llegadas algo más tardías. Entonces, vehículos que llegarían al final del período de verde y pasarían, en la versión original, quedarán detenidos durante toda la roja en el otro caso. Lo inverso debería ocurrir en los arcos de tráfico general, en que la tendencia del modelo original es a sobrepredecir el tiempo medio de viaje.

Pero estas variaciones se reflejarán en los patrones de salida, que son el punto de partida para generar las llegadas a la intersección siguiente. El efecto agregado no es predecible analíticamente por la forma compleja de los histogramas, de modo que es necesario investigarlo empíricamente. De esta labor se da cuenta en los capítulos siguientes.

### 3. Efectos en la Simulación del Tránsito

#### 3.1. Metodología

Los efectos que se pretende identificar, en este caso, son cambios en la estimación de demoras y detenciones para una programación dada de los semáforos de la red, como consecuencia del uso del nuevo modelo de dispersión. En rigor, el análisis debería limitarse a la componente uniforme de ellas pues la aleatoria es derivada mediante fórmulas ajenas a los histogramas. Sin embargo, esto plantea dificultades prácticas y haría algo más oscuro visualizar el impacto de conjunto, en magnitud absoluta.

El estudio se ha realizado separadamente para los modelos TRANSYT-8 y SATURN. Para el primero, se usa el índice de funcionamiento (IF) de la red, que es una suma económicamente ponderada de demoras y detenciones, que el programa entrega en su salida de resultados para cada arco y para el total de la red. Se trabaja con dos redes: una, real, representa la zona de acceso al centro de Santiago desde el Oriente y comprende 17 nodos semaforizados y 95 arcos (ver Figura 1); la otra, artificial, tiene una estructura sencilla y geométricamente simétrica, con nodos semaforizados, 4 cuellos de botella y 24 arcos (ver Figura 2).

Para SATURN, se utilizó una red real, correspondiendo a un área de la comuna de Providencia recientemente estudiada con dicho modelo (CITRA, 1985). Contiene 62 intersecciones y 461 movimientos simulados. Las demoras y detenciones aparecen directamente en la salida de resultados. En este caso, interesa también ver si hay algún cambio en la asignación de flujos que produce.

Tratándose de TRANSYT-8, se ha distinguido el caso de usar los parámetros estándar para T del de introducir otros valores para ellos.

En general, se compara la versión original del modelo con la que incluye, como única modificación, el nuevo modelo de dispersión. Esta última, por conveniencia, se denota por TRANSYT-8A y SATURN-A,



### 3.2. TRANSYT-8, con parámetros estándar para T

Este caso implica además que el valor de K en TRANSYT-8 es 0,35. Se simuló primero, con las versiones 8 y 8A, la red real usando la punta de la tarde. El IF obtenido, separando arcos de buses de arcos de tráfico general, para toda la red es:

	<u>TR-8</u>	<u>TR-8A</u>	<u>Δ(%)</u>
Buses	214,7	217,0	+ 1,1
Otros	704,7	693,9	- 1,5
Total	919,4	910,9	- 0,9

Tal como se preveía en el Capítulo 2, hay subestimación del IF en arcos de buses y sobreestimación en los otros, con el modelo original. Pero la diferencia es cuantitativamente pequeña, en conjunto.

Es necesario estudiar si ésto ocurre como efecto agregado o se da así arco por arco. Primero se hizo una verificación muestral de que la reproducción del tiempo medio de viaje fuera correcta con 8A y sesgada con 8, comprobándose la hipótesis mediante los histogramas que produce el modelo.

En cuanto al IF por arco, hay que distinguir tres casos:

- arcos de entrada a la red, en los cuales no hay dispersión y, consecuentemente, no hay variación;
- arcos de poca longitud, en los cuales el efecto de la dispersión es restringido. Se adoptó como límite para esta categoría una longitud de 80 m;
- arcos de longitud normal o grande.

La distribución del número de arcos y del IF por categoría aparece en la Tabla 1. Se excluyen 14 arcos de buses con paradero, cuyos IF no se toman en cuenta (Gibson, Saavedra y Spoerer, 1982).

Grupo de arcos	Tipo	Nº	TR-8	TR-8A	Δ(%)
Entrada	Buses	6	68,4	68,4	-
	Otros	13	240,7	240,7	-
Cortos	Buses	5	44,7	44,3	-0,9
	Otros	18	114,4	114,7	+0,3
Normales	Buses	12	101,6	104,3	+2,7
	Otros	27	349,6	338,5	-3,2
Total		81	919,4	910,9	-0,9

TABLA 1: Variación según grupo de arcos



La principal observación que surge es que el efecto en los arcos normales es de magnitud nada despreciable (3%). Una desagregación individual de este grupo se muestra en la Tabla 2, que contiene una clasificación de acuerdo con el monto porcentual de la diferencia entre IF con 8A versus con 8.

Puede apreciarse que sucede algo imprevisto: hay arcos de buses en que el IF disminuye y de otros vehículos en que aumenta, con la versión 8A. Lo mismo pasa, a nivel agregado, en los arcos cortos (cf. Tabla 1). La explicación de este fenómeno es que existen efectos compensatorios de las tendencias discutidas en el Capítulo 2.

En esencia, el mecanismo que les da origen es que, por ejemplo, en un arco de otros vehículos, las llegadas "tardías" a una intersección se transforman en salidas al inicio del período de verde, en vez de al final. Entonces, un patrón de llegadas "retrasado" se convierte en un patrón de salidas "adelantado" y aunque la dispersión de este último tiende nuevamente a retrasarlo, en conjunto esto último puede tener un peso menor. Así, las demoras y detenciones en el nodo siguiente serían menores que las calculadas por la versión 8A.

Hay factores de compensación adicionales, pero todos actúan de esta misma manera. En todo caso, los datos de la Tabla 2 reflejan que la tendencia principal es la prevista.

Por otra parte, en no pocos arcos hay diferencias sustantivas del IF entre ambas versiones, llegando a superar el 20% en módulo.

Otros Vehículos		Buses	
<u>% Dif.</u>	<u>Nº Arcos</u>	<u>% Dif.</u>	<u>Nº Arcos</u>
3 ó más	2		
0 a 3	6	2 a 5	3
0 a -3	3	0 a 2	5
-3 a -6	5	0 a -6	2
-6 a -10	5	sobre -6	2
-10 a -10	2		
sobre -20	4	Total	12
Total	27		

TABLA 2 : Rango de diferencias en IF, en arcos normales

En suma, la relativa constancia del IF de la red esconde cambios significativos. Nótese además que el efecto de sobrepredicción para autos y subpredicción para buses contribuye a la compensación del IF total, pero en forma espúrea. Ciertamente, las variaciones son de mucho mayor entidad a nivel de arco; no deja de ser afortunado que los factores compensatorios tengan fuerza suficiente para tender a anular las diferencias individuales.

Pero es indiscutible que ella dependerá de características particulares de cada red, de modo que no puede confiarse indiscriminadamente en su acción. Para confirmar esta aseveración, se aportan dos ejemplos. Uno es la simulación de un subconjunto de la red real y el otro es la de la red artificial (con repartos por equisaturación y desfases nulos en fase 1), cuyos IF figuran en la Tabla 3.

Red	Tipo Arcos	IF		$\Delta$ (%)
		TR-8	TR-8A	
a) Real reducida	Buses	8,2	8,0	- 2,4
	Otros	<u>123,2</u>	<u>118,6</u>	- 3,7
	Total	131,4	126,6	- 3,7
b) Artificial	Buses	24,5	24,6	+ 0,4
	Otros	<u>111,0</u>	<u>111,7</u>	+ 0,6
	Total	135,5	136,3	+ 0,6

TABLA 3: Simulación de otras redes

En el primer caso, la compensación actúa más débilmente y en sentido contrario en los arcos de buses. En el segundo, su fuerza es alta y dominante en arcos de otros vehículos. Finalmente, conviene señalar que el tiempo de ejecución no presenta variación perceptible, lo que era de esperar.

### 3.3. TRANSYT-8, con parámetros de T diferentes a los estándares

Aquí ya no tiene sentido comparar las dos versiones, por la rigidez de TRANSYT-8 a este respecto. Se trata de investigar, simplemente, la influencia de los parámetros de T, que controlan la dispersión con el nuevo modelo. Su importancia radica en que poder especificarlos es una ventaja adicional de éste.

Los valores usados para los parámetros, con la nomenclatura de las ecs. (10) y (11), son:  $\beta = 0,72$ ,  $\delta = 0,8$  y  $\sigma = 0,6$ . Estos fueron tomados de estimaciones preliminares en calles de Santiago (Gibson y Aguirre, 1984 a).

Fueron simuladas las redes real y artificial, con la versión 8A. Los resultados aparecen en la Tabla 4.

El efecto de conjunto es pequeño, en ambos casos, y de sentido variable. Téngase en cuenta que por ser T entero, la modificación de sus parámetros no siempre cambiará su valor ni, por lo tanto, el de F. Se desprende también que es natural que haya arcos para los cuales hay cambios de cierta magnitud y otros que permanecen invariantes. Con todo, el resultado agregado es poco significativo.



<u>Red</u>	<u>Tipo Arco</u>	<u>TR-8A est.<sup>1)</sup></u>	<u>TR-8A no est.<sup>2)</sup></u>	<u>Δ(%)</u>
a) Real	Buses	217,0	218,4	+ 0,6
	Otros	693,9	700,3	+ 0,9
	Total	910,9	918,7	+ 0,9
b) Artificial	Buses	24,6	23,9	- 2,8
	Otros	111,7	111,8	+ 0,1
	Total	126,3	135,7	- 0,4

1) con parámetros estándar

2) con parámetros diferentes.

TABLA 4: Efecto de parámetros de T en la simulación

### 3.4. SATURN, con parámetros estándar para T

En teoría, los cambios en los histogramas de flujo podrían acarrear consecuencias de considerable importancia en este caso. SATURN los utiliza para construir curvas demora-flujo en las que basa un proceso iterativo de asignación. Por esta razón, diferencias a nivel de arco parecerían tener un rol más destacado. Además, la inconsistencia del modelo original podría dar pie a perturbaciones en el proceso de convergencia interna simulación-asignación.

Pero cabe tener presente que la asignación se realiza para rutas (conjuntos de arcos) alternativas, de manera que los factores compensatorios antes comentados pueden reducir drásticamente el alcance práctico de las diferencias por arco. Es ahora evidente que ésta es una cuestión casuística; no obstante, se ha creído útil estudiar lo que ocurre en una cierta red, ya identificada.

Se corrió la red con las dos versiones (SATURN y SATURN-A) con iteraciones simulación-asignación, usando 25 intervalos para el ciclo, que es el máximo. Como éste es de 120 seg, el tamaño del intervalo es de 4.8 seg, bastante grande en comparación con lo que se usa en TRANSYT (1-2 seg). No se iteró con TRANSYT.

En cuanto al efecto sobre la convergencia del modelo, se puede decir que es irrelevante en este caso. El ciclo asignación-simulación converge en 3 iteraciones con ambos modelos, y en la última de ellas la convergencia interna de la simulación se logra en 7 iteraciones, igualmente.

El impacto sobre los histogramas de flujo es complejo de analizar porque se puede manifestar de varias maneras, cambiando:

- las curvas demora-flujo,
- la estimación de la capacidad, donde haya movimientos no-prioritarios,
- los flujos asignados por movimiento,
- las demoras y detenciones, para la red y por arco,



Conviene estudiar primero los indicadores globales, que se muestran en la Tabla 5.

Modelo	Demoras [veq-hr/hr]		Detenciones [det/hr.]
	Uniforme	Sobresaturación	
SATURN	170,4	4,9	46610,7
SATURN-A	169,4	0,8	46594,3
$\Delta(\%)$	-0,6	-83,7	0,0

TABLA 5: Indicadores globales (1 int = 4,8 seg)

Se aprecia que la variación es pequeña, salvo en demora por sobresaturación, y siempre favorece a la versión modificada. La excepción se debe a que hay un arco sobresaturado y esta última es capaz de generar una asignación que reduce el flujo por ese arco en el equilibrio.

No es de extrañar que las diferencias globales sean poco significativas, por las tendencias compensatorias que, en este caso, se reflejarán en readecuar la asignación. Pero ésto supone que dichas tendencias están efectivamente presentes. Para investigar este aspecto hay que desagregar. Una manera razonable de hacerlo es comparar la situación individual de los nodos de la red interna, para los cuales se calculan las demoras y detenciones.

Hay 38 de estos nodos en la red. De ellos, hay 13 en que la demora media es inferior a 1 seg., en los que cualquiera comparación estaría poco fundada. De los 25 restantes, hay 9 en que se presentan diferencias sensibles entre ambas versiones. La Tabla 6 muestra, para cada uno de estos nodos, la demora media, la capacidad y relación flujo/capacidad determinadas por el modelo (original y modificado).

En los nodos regulados por señal de prioridad, hay efectos notorios en la estimación de la capacidad, en dos de ellos. No ocurre, como es lógico, lo mismo en los semaforizados, excepto en el 19, en que el cambio se debe a un viraje con oposición no prioritario. Se observa también que no hay un directo paralelismo entre el sentido de la variación de la relación flujo-capacidad y el de la demora media. Es decir, la forma de los histogramas tiene un efecto reconocible.

Nodo	Tipo <sup>1)</sup>	Demora (seg)		Capacidad(veq/hr)		Flujo/capac.(%)	
		SAT	SAT-A	SAT	SAT-A	SAT	SAT-A
8	P	1,2	1,9	5566	5575	40,9	40,7
12	P	3,0	2,6	4633	4826	26,8	25,7
16	S	9,7	10,0	3238	3231	78,4	80,3
17	S	9,5	9,1	6007	6012	53,4	54,2
19	S	6,9	6,5	8792	8909	39,1	38,7
20	S	3,6	3,2	6614	6613	41,4	41,2
27	P	1,8	1,2	7455	7583	25,3	24,9
33	S	10,7	9,9	6907	6907	87,1	87,1
36	S	10,8	11,3	7757	7758	75,9	75,8

- 1) P : regulado por señal de prioridad  
S : regulado por semáforo.

TABLA 6 : Indicadores por nodo

Ahora bien, aunque los cambios en la demora media pueden ser porcentualmente altos, su magnitud absoluta es pequeña. Esto explica que ellas den origen a cambios marginales en los flujos asignados, como puede deducirse de las últimas cuatro columnas de la tabla. Así actúa la compensación.

Es posible que el tamaño del intervalo reduzca el efecto del nuevo modelo de dispersión porque éste depende mucho de la forma del histograma en los extremos del período de verde efectivo. SATURN pierde la forma al interior del intervalo y hace interpolaciones si el inicio o fin del período de verde no coinciden con un límite del intervalo. Con el objeto de investigar la importancia del tamaño del intervalo, se corrió la misma red con 10 intervalos por ciclo (1 intervalo = 12 seg). Los indicadores globales obtenidos figuran en la Tabla 7.

Recordando los datos de la Tabla 5, es claro que afinar el intervalo mejora globalmente los resultados. Pero la versión modificada no evidencia ahora un comportamiento sistemáticamente mejor, como ocurría con el intervalo más pequeño, o sea, es sensible al tamaño de éste.

Los cambios expuestos tienen relación con los que afectan a las curvas demora-flujo en que el modelo basa su asignación. Una inspección de los parámetros de ellas muestra variaciones que sólo en un número reducido de casos alcanzan una magnitud considerable.

Modelo	Demoras [veq-hr/hr]		Detenciones [det/hr.]
	Uniforme	Sobresaturación	
SATURN	178,7	6,9	46744,4
SATURN-A	174,1	6,9	47931,7
$\Delta(\%)$	-2,6	0,0	+2,5

TABLA 7 : Indicadores globales (1 int. = 12 seg)

En conjunto, el nuevo modelo no introduce modificaciones espectaculares en la red estudiada en términos de los indicadores de convergencia y de demoras o detenciones. No obstante, es capaz de encontrar una asignación de flujos marginalmente mejor y, en particular, que reduce drásticamente la demora por sobresaturación. Esto hace pensar que la mayor consistencia, a pesar de las limitaciones del SATURN para aprovecharla, tiene consecuencias positivas, cuya magnitud puede ser bastante mayor en redes más saturadas que la del ejemplo. Pero es preciso agregar que la modificación, para que tenga sentido, debe ir acompañada de fijar un tamaño relativamente pequeño para el intervalo. Esto supone un mayor gasto computacional que normalmente se justificará, incluso por el solo aumento en la precisión que se produce.

#### 4. Efectos en la Optimización de Semáforos

##### 4.1. Metodología

Al utilizar TRANSYT-8 para optimizar, y no sólo simular, redes semaforizadas pueden aparecer diferencias en los índices de funcionamiento y también en los planes óptimos determinados. Entonces, dichos índices no serán directamente comparables como lo eran al simular con planes dados. Esta dificultad puede resolverse recurriendo a simulaciones cruzadas de los planes óptimos.

Nuevamente, se distinguen los casos de usar o no los parámetros de dispersión estándares. Las redes empleadas son las mismas del capítulo precedente. Obviamente, este aspecto del análisis no cabe en el modelo SATURN, que tiene la programación como dato de entrada. No obstante, dado que se recomienda iterar exógenamente sus resultados con TRANSYT, habrá efectos indirectos.

##### 4.2. TRANSYT-8, con parámetros estándar para T

Con el fin de cubrir situaciones relativamente diversas dentro de un con-  
sumo razonable de recursos computacionales, se trabajó con la red artificial. Introduciéndole modificaciones que se detallan en la Tabla 8, se generaron a partir de ella cuatro redes adicionales a la básica.



Las cinco redes fueron optimizadas con TRANSYT-8 y con TRANSYT-8A, partiendo de una misma situación: repartos por equisaturación y desfases nulos en fase 1. Para todas se usó el ciclo aparentemente óptimo: 36 seg, seleccionado por el propio programa.

Los resultados se muestran en las Tablas 9 y 10. En la primera figuran los desfases óptimos para la fase 1, referidos a una base temporal común, en tanto la segunda contiene los índices de funcionamiento respectivos para los planes inicial y óptimo.

<u>Caso</u>	<u>Modificación a la red básica</u>
1	Mayor longitud de los arcos
2	Proporción entre los arcos contribuyentes
3	Mayor velocidad en todos los arcos
4	Disminución del ponderador de demoras

TABLA 8: Redes artificiales adicionales

Red	Modelo	Nodo			
		1	2	3	4
Base	TR-8	0	-5	-2	5
	TR-8A	0	28	22	8
1	TR-8	0	2	8	0
	TR-8A	0	2	8	0
2	TR-8	0	7	18	6
	TR-8A	0	7	19	7
3	TR-8	0	28	21	8
	TR-8A	0	28	21	8
4	TR-8	0	-5	-1	6
	TR-8A	0	29	23	9

TABLA 9: Desfases óptimos en fase 1 (en seg.)

Situación	Arcos	Inicial		Optimo	
		TR-8	TR-8A	TR-8	TR-8A
Base	Buses	24,5	24,6	22,8	23,3
	Otros	111,0	111,7	107,2	103,0
1	Buses	26,1	26,3	23,9	24,1
	Otros	109,7	108,0	108,4	106,3
2	Buses	25,5	25,5	25,4	25,3
	Otros	117,9	118,5	111,0	109,8
3	Buses	28,5	28,6	24,9	24,9
	Otros	131,1	132,2	115,9	114,3
4	Buses	17,2	17,3	16,0	16,3
	Otros	82,3	82,8	79,0	75,5

TABLA 10 : Indices de funcionamiento con optimización independiente

Varios comentarios son pertinentes. De partida, los repartos óptimos se mantienen en casi todos los casos, con raras excepciones en que hay un segundo de variación en el nodo 1, de manera que basta con los datos de un grupo de desfases para comparar los planes óptimos. Para cada modelo, hay diferencias importantes de éstos según la red; no obstante, hay identidad, o casi, entre modelos en las redes 1, 2 y 3. Luego, el plan óptimo es más sensible a las características diferenciadoras empleadas que al modelo de dispersión, aunque éste lo altera notoriamente en algunas de las situaciones estudiadas.

Esto tiene su contrapartida en los IF, que son sumamente parecidos en las redes 1, 2 y 3 pero difieren en un 4% en los otros dos casos. Es interesante constatar que, salvo la red 2, el IF inicial es peor con la versión 8A pero en el óptimo es siempre mejor. En las tres redes de igual plan óptimo este resultado no tiene un significado especial. Pero hay que estudiar si lo tiene en las otras dos. A estos efectos, se procedió a hacer simulación cruzada de los óptimos. La comparación, mediante IF totales para hacerla más clara, se muestra en la Tabla 11.

Es sabido que el algoritmo de TRANSYT no garantiza el óptimo global. Entonces, estas cifras sugieren fuertemente que la versión modificada tiene mejores propiedades de consistencia al respecto. Observando que a pesar de que los planes varían bastante entre redes, los IF cambian poco (salvo, lógicamente, por el cambio de ponderador en la red 4) se concluye que la unicidad del óptimo es poco nítida. Esto acrecienta la importancia de la consistencia señalada, añadiendo un claro y poderoso argumento en favor del nuevo modelo de dispersión.

Red	Modelo	Optimo Propio	Optimo Cruzado	$\Delta(\%)$
Base	TR-8	130,0	128,8	-0,9
	TR-8A	126,3	126,3	0
4	TR-8	95,0	93,7	-1,4
	TR-8A	91,8	94,9	+3,4

TABLA 11: Simulación cruzada de óptimos (IF total)

#### 4.3. TRANSYT-8, con parámetros de T diferentes a los estándares

Los experimentos se realizaron sólo con la versión 8A, por las razones antes explicadas, trabajando con los valores incorporados actualmente a TRANSYT-8 y con los parámetros alternativos referidos en la Sección 3.3.

Como el mayor cambio en los parámetros atañe a  $\sigma$ , asociado a los buses en arcos con parada, se asignó a éstos en la red real ponderadores de demoras y detenciones no nulos (como ocurría en la simulación), idénticos a los de arcos sin paradero. Tanto esta red como la artificial base fueron optimizadas con los dos conjuntos de parámetros, limitando la optimización a los desfases solamente. Los IF correspondientes se presentan en la Tabla 12.

Red	Arcos	8A est. <sup>1)</sup>	8A no est. <sup>2)</sup>	$\Delta(\%)$
Real	Buses	567,6	552,0	-2,7
	Otros	663,4	670,0	+1,0
	Total	1231,0	1222,0	-0,7
Artificial Base	Buses	23,3	23,5	+0,9
	Otros	103,0	103,8	+0,8
	Total	126,3	127,3	+0,8

- 1) : con parámetros estándar  
 2) : con parámetros no estándar.

TABLA 12: IF en el óptimo respectivo

No se aprecian variaciones importantes en el IF total y su signo es opuesto entre ambas redes. Pero vale la pena resaltar que en la red real, si los parámetros nuevos son más representativos de las condiciones locales, el óptimo encontrado con ellos es más favorable, y en magnitud no despreciable, para la locomoción colectiva. Esto puede ser una casualidad



pero merece una mayor investigación. De hecho, si se toman en cuenta sólo los arcos de buses normales, con la nomenclatura definida en la sección 3.2, el IF es inferior en 9,2%,

En cuanto a los planes óptimos, son iguales en la red artificial y algo diferentes en la real (ver Tabla 13).

Nodo	Inicio Fase 1		Nodo	Inicio Fase 1	
	8A est.	8A nest.		8A est.	8A nest.
57			66		
57	14	13	66	79	76
58	8	7	67	27	29
59	77	76	68	87	85
60	0	0	69	24	23
61	83	83	70	16	15
62	5	5	71	0	0
63	25	25	72	13	11
64	23	22	73	21	19
65	43	43			

TABLA 13: Desfases óptimos en fase 1 (en seg)

Globalmente considerado, introducir valores distintos a los estándares para los parámetros de dispersión no parece conducir a cambios relevantes en la optimización. No obstante, hay indicios de que en ciertas condiciones (por ejemplo, redes grandes con pocos arcos de entrada y con presencia importante de buses) podría tener efectos perceptibles.

## 5. Conclusiones

Los múltiples experimentos cuyos resultados han sido presentados en los capítulos precedentes confirman, en primer lugar, que el efecto agregado del nuevo modelo de dispersión es un asunto complejo. La acción de factores compensatorios a nivel de la red confiere una alta estabilidad al modelo original, a pesar de su demostrada inconsistencia. No obstante, algunos de los ejemplos aportados muestran fehacientemente que dichos factores no siempre hacen despreciables las diferencias con el nuevo modelo y que no evitan la existencia de considerables discrepancias a nivel de arcos individuales.

El sentido en que se modifica la simulación del tráfico con el nuevo modelo está en línea con el análisis teórico que lo sustenta. La optimización de semáforos es sensible a su forma pero varía poco con sus parámetros.

Desde un punto de vista pragmático, las diferencias encontradas fundamentan sólidamente la modificación del modelo de dispersión, principalmente por sus ventajas en materia de consistencia. Si bien la variación de los IF no supera, en los ejemplos analizados, un 4 ó 5% para una red, debe tenerse presente que muchas de las medidas de gestión del tránsito que se estudian con modelos como TRANSYT o SATURN no producen beneficios porcentualmente superiores a dicha cifra. Incluso, proyectos de inversión de costo reducido pueden generar ahorros de similar magnitud y estar económicamente justificados. La posibilidad de especificar valores para los parámetros de T es una ventaja adicional, cuya utilidad es todavía poco clara.

Más aún, la modificación es muy sencilla y no eleva el tiempo de ejecución de los programas computacionales. Es decir, su relación beneficio-costó es alta.

Quedan incógnitas por resolver, particularmente sobre el papel de los parámetros del nuevo modelo de dispersión. El uso frecuente y cada vez más generalizado de TRANSYT y SATURN en Chile, en estudios de gestión del tránsito y de inversiones viales urbanas, exige nuevas investigaciones al respecto, con énfasis en la modelación de la locomoción colectiva de superficie.

#### Agradecimientos

El autor expresa su reconocimiento a Patricia Ross y Raúl Erazo, quienes prepararon las redes reales utilizadas, a éste y a Sergio Avila por su ayuda en la modificación de los programas computacionales y a Rodrigo Fernández, que dibujó las figuras.

#### Referencias

- BOLLAND, J.D. , HALL, M.D. y VAN VLIET , D. (1979) SATURN: a model for the evaluation of traffic management schemes. Working Paper 106, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Inglaterra.
- CITRA (1985) Estudio de mejoramiento de la red vial delimitada por Avenida Lota, Tobalaba, El Bosque, Isidora Goyenechea, Andrés Bello y Los Leones. Informe final a la Ilustre Municipalidad de Providencia, Santiago
- GIBSON, J. (1985) Un método de calibración de los parámetros de dispersión del tráfico. Publicación ST-INV/01/85, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago (en preparación).
- GIBSON, J. y AGUIRRE, J.F. (1984a) Sobre la correcta especificación y calibración del modelo de dispersión de Robertson. Publicación ST-INV/01/84, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- GIBSON, J. y AGUIRRE, J.F. (1984b) Replanteamiento del modelo de dispersión de Robertson. Actas del Primer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile, 7-9 Mayo 1984, Santiago.

- GIBSON, J., SAAVEDRA, A. y SPOERER, J.P. (1982) Experiencias de la implementación de un sistema de control de área de tráfico en Santiago de Chile. Segundo Congreso Panamericano sobre Ingeniería de Tránsito y Transporte, Universidad del Cauca, 8-12 Noviembre, 1982, Popayán.
- ROBERTSON, D.I. (1969) TRANSYT: a traffic network study tool. RRL Report LR 253, Road Research Laboratory, Crowthorne.
- ROBERTSON, D.I. (1974) Cyclic flow profiles. Traffic Engineering and Control, Vol. 15, N° 14, 640-641.
- ROBERTSON, D.I. y VINCENT, R.A. (1975) Bus priority in a network of fixed time signals. TRRL Report LR 666, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- VINCENT, R.A., MITCHELL, A.I. y ROBERTSON, D.I. (1980) User guide to TRANSYT version 8. TRRL Report LR 888, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.





C = 90 seg.

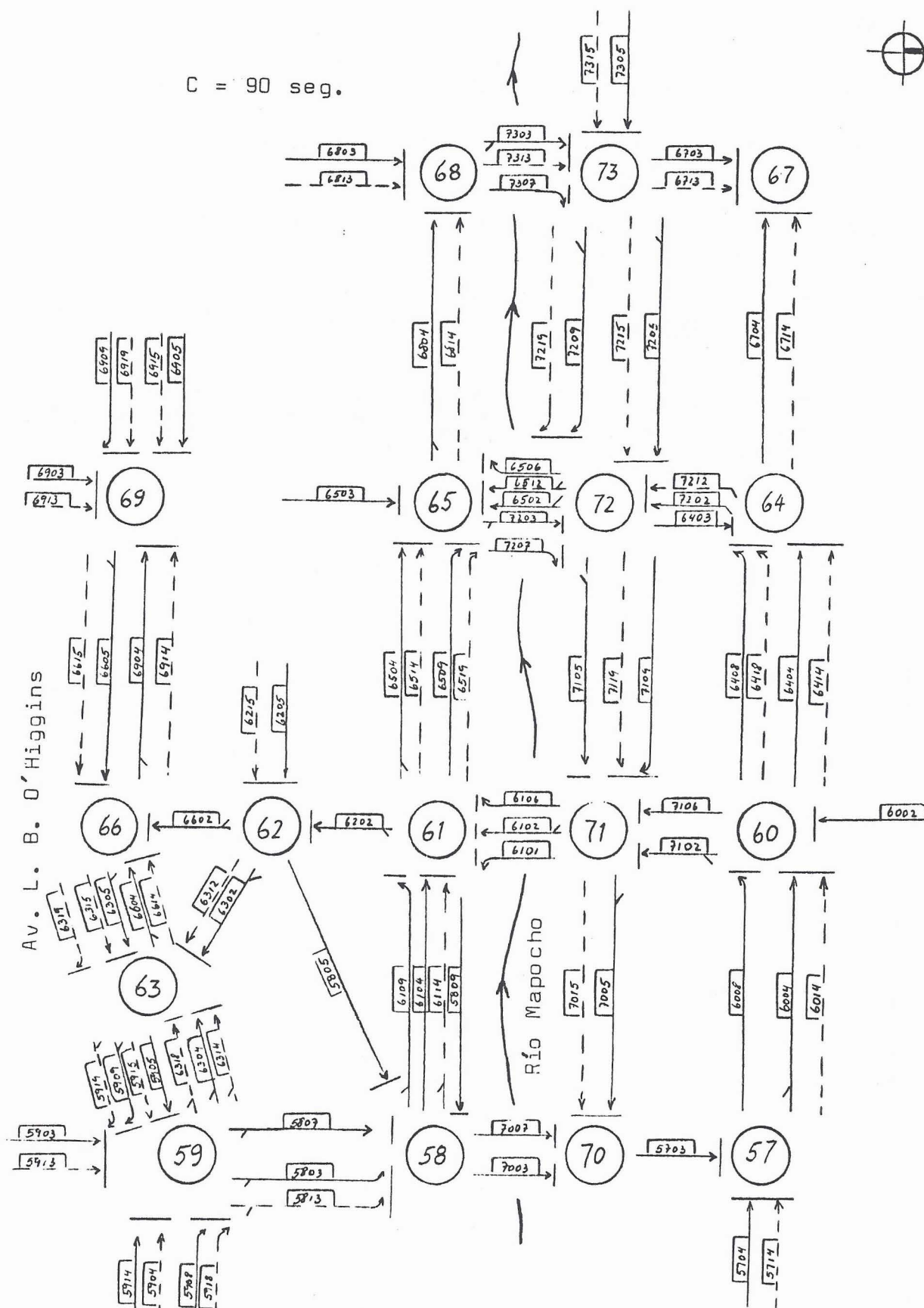


FIGURA 1 : Red real

$C = 36 \text{ seg.}$

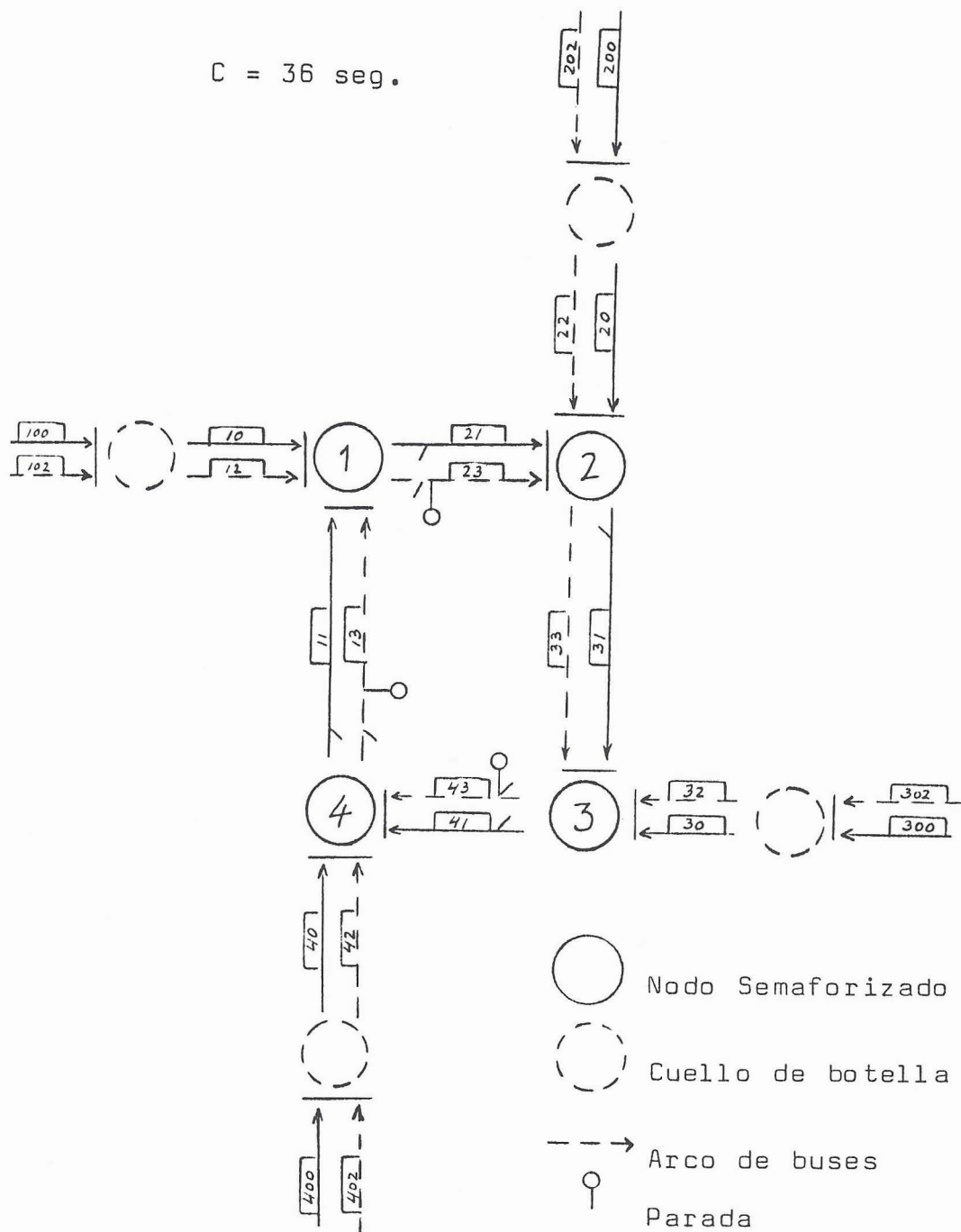


FIGURA 2 : Red artificial