

## SIMULACION DE BUSES EN EJES SEMAFORIZADOS

Juan Enrique Coeymans A. y Hugo Hernán Novoa V.  
Departamento de Ingeniería de Transporte  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Vicuña Mackenna 4860 Santiago Chile

Luis Willumsen V  
Transport Studies Group  
University College  
20 Flacskmann Terrace Londres WC1 Inglaterra

### RESUMEN

Como parte de la investigación conjunta anglo-chilena sobre control de tráfico urbano, realizada en los años 1985 a 1987, se vió la necesidad de ajustar la modelación de los buses en TRANSYT a fin de lograr el máximo de rentabilidad social en la coordinación de semáforos.

Los objetivos del presente trabajo son explicar la calibración realizada, proponer nuevas definiciones de algunos parámetros de TRANSYT y la forma más adecuada de estimarlas y mostrar los resultados altamente rentables en términos sociales que se produjeron como consecuencia del trabajo efectuado.

Junto con las principales recomendaciones y conclusiones a las que se llegó, se adjunta una breve descripción de parte del numeroso software producido, así como los alcances metodológicos más importantes para continuar investigando hacia adelante.

## 1. INTRODUCCION.

### 1.1 Objetivos y Alcances.

Como parte de la investigación conjunta anglo-chilena sobre control de tráfico urbano, realizada en los años 1985 a 1987, se vió la necesidad de ajustar la modelación de los buses en TRANSYT a fin de lograr el máximo de rentabilidad social en la coordinación de semáforos.

Los objetivos del presente trabajo son diversos, por una parte explicar el trabajo de calibración realizado, en segundo lugar proponer nuevas definiciones de algunos parámetros de TRANSYT y la forma más adecuada de estimarlas y por último mostrar los resultados altamente rentables en términos sociales que se produjeron como consecuencia del trabajo realizado.

No se entregan en este documento por razones de extensión la amplia bibliografía revisada así como los detallados procedimientos computacionales efectuados para recoger y procesar información. Respecto a las rentabilidades sociales obtenidas sólo se entregan los resultados finales, pues tanto los detalles de este último punto como los aspectos anteriores no entregados, pueden consultarse en documentos bases a los cuales se hará mención.

### 1.2 Contenido.

Aparte de esta Introducción este trabajo consta de otros cinco capítulos.

En el Capítulo 2 se entregan las consideraciones generales sobre la dispersión de flujos de buses en redes semaforizadas. El Capítulo 3 detalla la forma en que fueron realizadas las calibraciones y las nuevas definiciones de parámetros a los que se llegó.

En el Capítulo 4 se entregan los principales resultados de ajuste entre histogramas de flujos de buses observados e histogramas de flujo de buses modelados, se entregan así mismo las principales indicadores de mejoramiento en la operación y de rentabilidad social obtenidas.

En el Capítulo 5 se enumera brevemente el software producido, para la realización del trabajo anterior, y por último en el Capítulo 6 se entregan las principales conclusiones y recomendaciones.

## 2. MODELACION DE DISPERSION DE BUSES.

### 2.1 Problema General.

Una de las principales diferencias del tráfico entre países desarrollados y en desarrollo es la cantidad de buses observados en las calles. Flujos de 80 a 180 buses por hora en la mayoría de los países desarrollados se consideran lo suficientemente altos como para justificar la introducción de una pista exclusiva, (Coeymans y Willumsen, 1986). Un esquema bien

diseñado reducirá la demora en los buses sin incrementar ostensiblemente las demoras a otros vehículos. Tales pistas exclusivas generalmente operan bien en países desarrollados porque existe muy poca interferencia entre buses, los paraderos están bien definidos, situados a una distancia razonable de las intersecciones, y son respetados.

Las condiciones son bastante diferentes en los países en desarrollo, donde flujos de 200 a 300 buses por hora y dirección son bastante frecuentes; algunas veces incluso se han contado sobre ejes arteriales importantes, flujos de 600 buses por hora, (Dawson, 1982). Con un volumen así, un esquema de pista exclusiva para buses requeriría dos pistas, y algunos proyectos de ese tipo se han implementado. Sin embargo una doble pista exclusiva es difícil de poner en práctica donde el número de pistas disponibles es pequeño. Más aun, la fricción y la interferencia entre los buses, en particular alrededor de las áreas de paraderos, reduce la efectividad de proyectos como los anteriores.

El esquema desregulado de operación del transporte público en el caso de Santiago, en que todos los buses (con la excepción de una línea o cooperativa) son conducidos por una sola persona, y en que, el salario del chofer depende en gran medida de los boletos vendidos, influye fuertemente en la forma de desplazarse y detenerse de los buses.

Aunque los paraderos oficiales de locomoción colectiva están definidos por una señal de tráfico, e incluso en algunos casos existe un pequeño cobijo en caso de lluvia o mal tiempo, los buses sin embargo normalmente se detienen a recoger pasajeros dondequiera se detenga y operan con un esquema que responde a la demanda espontánea de los viajeros.

Hay muy poca investigación publicada sobre este tipo de comportamiento del tráfico de buses. Se ha sugerido que el comportamiento del tráfico de este tipo de buses es independiente de la estrategia de control de tráfico que se implemente, haciendo irrelevante de esta forma la coordinación de semáforos. Si este es el caso, los beneficios de sistemas de coordinación de semáforos tenderían a ser mucho menores en los países en desarrollo que en los industrializados.

Por supuesto, no todas las áreas de paraderos presentan este tipo de comportamiento, si el número de pasajeros y/o de buses es relativamente bajo, entonces la forma de operar de los paraderos será muy similar a la observada en los países de Europa occidental: un simple paradero para dejar o llevar pasajeros. La única diferencia radicará en que la localización exacta del paradero será más dispersa en vez de claramente definida.

Es posible por lo tanto distinguir al menos dos tipos de "áreas paraderos": los paraderos convencionales o de baja fricción y los paraderos de alta fricción o áreas-paraderos de gran interferencia.

En el caso del presente trabajo, los paraderos de la zona norte de Recoleta pertenecen al primer tipo, y los de la zona sur de la avenida sobre la que se efectuó los experimentos son del segundo tipo.

La concentración en el tema de modelación de buses fue un imperativo surgido del interés en mejorar la performance de TRANSYT. El objetivo

específico fue tratar de conseguir en TRANSYT una buena representación (la mejor posible) del comportamiento de los buses en los dos tipos de enlaces: con alta y con baja fricción.

## 2.2 La dispersión de Pelotones en TRANSYT.

TRANSYT no trata a los vehículos individualmente sino en paquetes o pelotones, (Vincent, Mitchell y Robertson, 1988). Estos son abordados como una función del tiempo, siendo la unidad básica un incremento de tiempo  $i$ , múltiplo del tiempo del ciclo común.

Los pelotones son representados por sus histogramas o perfiles de flujos cíclico (CFP) y su dispersión desde las entradas aguas arriba sobre el enlace hasta la siguiente detención (paradero o líneas de parada). La forma de las partidas o salidas desde una línea de parada se define como perfil de salida (o OUTPROFILE).

La forma de las llegadas a una línea de parada queda descrita por el perfil de llegada (o INPROFILE) el cual a su vez está constituido por los flujos contribuyentes desde las entradas aguas arriba y representados por sus perfiles, OUT o de salidas.

Los perfiles de llegada y de salida están relacionados por la fórmula:

$$q_1(i+t) = F * q_1 * p + (1 - F) * q_1(i+t-1) \quad (2.1)$$

donde:

$q_1(i+t)$  = es el flujo en la posición de tiempo  $i$  del perfil de llegada.

$q_1$  = es el flujo en el intervalo  $i$  del perfil de salida.

$p$  = proporción del perfil de salida que contribuye o entra al enlace considerado.

$t$  = 8.8 veces el tiempo medio de travesía (RT) a lo largo del enlace y corresponde al tiempo mínimo de viaje.

$F$  = es el coeficiente de dispersión del peloton calculado como:

$$F = \frac{1}{(1 + K*t)} \quad \text{para los autos.} \quad (2.2)$$

En principio el coeficiente  $K$  de la fórmula anterior debería ser calibrado para cada tipo de enlace. Habría evidencia de que este coeficiente depende de factores como el gradiente, la interferencia peatonal y las velocidades de flujo libre. Sin embargo la recalibración de este parámetro es raramente efectuada, y el valor por defecto 0.35 es empleado la mayoría de las veces.

La ecuación equivalente a la (2.2) para buses está dada por:

$$F = \frac{1}{(1 + 0.7 ST + 0.15 RT)} \quad (2.3)$$

En este caso:

ST = tiempo promedio detenido en paradero.

RT = tiempo medio de travesía sobre el enlace.

Puede demostrarse que esta fórmula es equivalente a escribir:

$$F = 1 / (1 + T_{medio} - T_{mínimo}) \quad (2.4)$$

donde:

$$T_{medio} = ST + RT$$

$$y \quad T_{mínimo} = a * ST + b * RT \quad (\text{con } a = 0.30 \text{ y } b = 0.85)$$

donde  $T_{medio}$  es el tiempo medio de viaje y  $T_{mínimo}$  es el tiempo mínimo de viaje sobre el enlace considerado.

De nuevo los coeficientes 0.7 y 0.15 (o los correspondientes a y b) deberían ser calibrados en principio para cada tipo de enlace. Puede verse que el coeficiente "a" está relacionado con la variabilidad del tiempo de detención en paradero (mientras mayor la variabilidad, mayor el valor de a) y el de "b" a la variabilidad de tiempo de travesía. Se esperaba originalmente que en las áreas de paraderos de alta fricción se requeriría un valor mayor para "a".

TRANSYT 8 no permite cambios en las fórmulas de dispersión anterior (2.3 y 2.4). Se modificó por lo tanto el programa de manera que los nuevos parámetros pudieran entrarse siguiendo convenciones similares a aquellas que permiten cambiar el valor de K en la fórmula de dispersión de autos.

### 3. PROCESO DE CALIBRACION

#### 3.1 Generalidades.

En principio el trabajo de calibración se puede realizar sobre una red coordinada o no, sin embargo, es mucho más sencillo calibrar la dispersión de pelotones usando un conjunto de planes para semáforos de tiempo fijo.

Consideremos primero el problema de calibración del modelo de dispersión de pelotones para buses sin una coordinación de semáforos. Esto puede ser realizado colocando observadores aguas abajo de una intersección semafORIZADA y medir CFP mientras los vehículos continúan bajo condiciones de flujo libre (sin interferencias de aguas abajo). Este método fue el utilizado para calibrar la fórmula original de dispersión de TRANSYT y podría haber sido utilizado en este caso también. Pero no sólo se está preocupado de la dispersión de los pelotones de buses sino que además nos interesa la respuesta de los conductores frente a las señales de tráfico, y este efecto, no necesariamente quedaría reflejado en la colección de CFPs si las predicciones se realizan en la forma clásica ya descrita.

Por ello se decidió realizar las mediciones sobre un conjunto de planes para semáforo de tiempo fijos y localizar a los observadores inmediatamente aguas abajo de la línea de parada como se puede apreciar en la figura 1. Las mediciones de CFP fueron registradas mediante el uso de microcomputadores EPSON PX-8 y un programa diseñado para ello, (Coeymans, 1986) que puede distinguir entre autos, buses y camiones, comenzando los registros junto con la señal de verde.

Las CFPs fueron recolectadas aproximadamente 18 metros aguas abajo de la línea de parada por dos razones. Primero, es la única forma de que el medidor logre captar todos los vehículos aun cuando un bus se detenga sobre la línea de parada, y segundo, no se introducen los efectos del transiente (respuesta a la señal y aceleración), que se experimenta justo en el momento de colocar la señal de verde.

Cada medición comprendía alrededor de 30 o 40 ciclos en cada lugar de recolección y en forma simultánea.

El código de TRANSYT debió modificarse de manera de poder rescatar los OUTPROFILE y escribirlos en un archivo. Un nuevo programa debió desarrollarse que tomara los CFPs recogidos en terreno y los CFPs teóricos modelados por TRANSYT y los comparara en forma gráfica. Los tipos de gráficos producidos por este programa pueden observarse en las figuras 2 y 3.

De una comparación visual directa de las CFP (CFP0 para las observadas y CFPt para las generadas por TRANSYT) se puede apreciar que los valores utilizados por TRANSYT por defecto no se ajustan bien a las condiciones de la red en estudio. En una primera instancia se alteraron dichos valores en busca de mejores resultados, pero no fue suficiente. Se sugirió entonces, usar las CFP0 para estimar algunos de los principales datos de entrada a TRANSYT como: flujo de saturación y parámetros de

dispersión además de proveer las indicaciones para revisar otros datos como tiempo de travesía, proporción de buses que paran, tiempo de parada de los buses y otros. Cada una de estas variables de alguna forma incide en la formulación para la dispersión de pelotones y por ende en la cercanía de lo observado y lo modelado. Este método de calibración fue el utilizado y en las secciones posteriores se discute las decisiones que se fueron tomando para lograr los objetivos.

### 3.2 Flujo de Saturación.

El principal problema en la medición del flujo de saturación en la línea de parada usando las técnicas standard, es que ellas no toman en cuenta las interferencias de los paraderos de buses. Los métodos clásicos indican que la medición debe detenerse al mismo instante en que la cola ha desaparecido. En muchos casos la cola no ha desaparecido pero buses rodando lentamente en el arco hacen que el medidor detenga la medición sobrevalorando este valor. Una nueva definición de flujo de saturación para este caso fue seguida y como una forma alternativa de obtenerlos era directamente de los CFPo, se adoptó esta técnica, más una confirmación cuidadosa en el terreno.

### 3.3 Tiempo de Travesía y Velocidades.

Uno de los primeros parámetros revisados y alterados en la simulación de dispersión de pelotones fue el tiempo de travesía. En general se obtuvieron mejores resultados con una reducción de velocidades. Esto fue probado con una reducción global en TRANSYT y originó la idea de redefinir las velocidades promedio en cada arco, debiéndose volver sobre los registros de velocidades originales.

Las velocidades promedio se habían calculado considerando sólo los tramos en los cuales los vehículos alcanzaban una travesía libre, pero ello deja fuera las interferencias entre vehículos (ej.: buses que se detienen alterando las velocidades de los autos). Para incluir tal efecto la observación y el análisis arrojaron las siguientes conclusiones:

- La definición original de velocidad de travesía causa una sobre-estimación y no considera la fricción de los paraderos.
- La nueva definición adoptada es: las velocidades consideradas para el promedio son las usadas por el vehículo desde 12 segundos luego de su primer movimiento hasta su reducción de velocidad a la entrada de la siguiente intersección.
- Las reducciones de velocidad en medio del enlace son incluidas para considerar la fricción del paradero.

En la mayoría de los casos la aplicación de la nueva definición resultó en una disminución de velocidad de travesía para los autos y buses. La figura 4 muestra esquemáticamente las modificaciones para el cálculo de las nuevas velocidades.

Se está consiente que TRANSYT procesa la velocidad de travesía de los

buses considerando la aceleración y frenado en un sólo paradero. El problema que queda pendiente es la representación de situaciones en los cuales un bus efectúa múltiples paradas en un enlace.

### 3.4 Proporción de Buses que se detienen en paraderos.

La red de TRANSYT empleada distingue entre enlaces de buses que se detienen y buses que no se detienen en paraderos. Se encontró que aumentar el flujo sobre los enlaces de buses que se detienen producía una mejor representación en TRANSYT.

Como consecuencia de los anterior, la proporción de buses que paraban estaba obviamente subestimada.

La causa de esta subestimación se debía a la definición original de un bus que se detiene en paradero, entendiendo por tal sólo a aquel que se detiene en razón de dejar o tomar pasajeros. Otras detenciones durante el periodo de verde no fueron tomadas en cuenta, ya que se asumió que la coordinación de semáforos reduciría la interferencias que generaba esas detenciones. Esta hipótesis fue sugerida por la contrapartida inglesa del Transport and Road Research Laboratory.

Desgraciadamente, la interferencia no es causada por la ausencia de coordinación de semáforos, sino por el número de buses que compartía el área-paradero: cuando un bus se detiene a tomar o dejar pasajeros, uno o más buses detrás pueden quedar atrapados detrás de él, y son forzados a realizar una detención innecesaria o al menos a prolongar sus paradas.

Como resultado de lo anterior, se realizó una nueva estimación en terreno de la proporción de buses que se detienen, incluyendo ahora todos los tipos de detención en paradero.

### 3.5 Tiempo Detenido en Paraderos.

Originalmente se pensó que el tiempo gastado en paraderos estaba bien estimado, pero el cambio en la definición de detención realizado en el punto anterior obligó a revisarlo de igual manera.

Se obtuvo nuevos tiempos con mediciones en terreno que fueran consistentes con la nueva definición de parada. Puede ser que algunos de estos cambios fueran debidos a alteraciones respecto al número de pasajeros que abordaban los vehículos en el área de estudio. Se pensó que no habiendo cambios sustanciales en la operación física o estacional del uso de suelo no deberían ser ellos significativos. En todo caso, era necesario ser consistentes con la definición de parada dada en el punto 3.4.

### 3.6 Remodelación de la Red de TRANSYT.

En la modelación original de la red de TRANSYT se empleó enlaces de autos y enlaces de buses compartiendo la linea de parada (y el flujo de saturación correspondiente). Sin embargo, la comparación de los histogramas para buses y para autos sugirió que ésta no era una hipótesis

realista.

En efecto, las condiciones en el área de estudio son tales, que muy a menudo las dos pistas cercanas a la acera son ocupadas principalmente por buses y sólo por otros vehículos cuando giran a la derecha. La pista más cercana a la mediana es usada predominantemente por otros vehículos. Por lo tanto, al formar corrientes separadas, estos últimos vehículos no deberían modelarse como si compartieran la linea de parada y el flujo de saturación.

La definición de la nueva red lleva a emplear dos líneas de parada separadas diferentes en cada rama: una para buses y vehículos que giran a la derecha y la otra para el resto del tráfico.

Cada línea de parada tiene su flujo de saturación correspondiente calculado desde los perfiles de flujo cíclico o de nuevas observaciones en el terreno. La figura 5 muestra la nueva estructura de enlaces junto a la primitiva.

### 3.7 Cambios a los parámetros de dispersión.

Solamente cuando los mejoramientos que resultaron de los cambios anteriores fueron agotados, se consideró cambios en los parámetros de dispersión de pelotones de buses.

No se empleó un método estadístico riguroso para alcanzar el mejor ajuste entre pelotones observados y modelados de manera que simplemente se verificaron diferentes valores y se compararon visualmente los perfiles de flujo cíclico.

Algunas de las principales características de esta tarea son las siguientes:

- a) Los valores por defecto producen resultados razonables para enlaces con pequeña interferencia de paraderos de buses, (enlaces norte del área de estudio).
- b) El fenómeno de la interferencia parece estar mejor modelado por un aumento en el parámetro que representa la variabilidad en el tiempo de travesía . Esto se debe probablemente a la conducta de los conductores de buses que se arrastran en busca de pasajeros, sin llegar a una detención completa. Aumentar el parámetros b desde 0,15 a 0,35 parece ser necesario en enlaces con paraderos de alta fricción.
- c) Cambios en el parámetro "a" parecen ser poco efectivos para representar el comportamiento de buses en enlaces de alta fricción.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Preliminares.

Los principales resultados de la modelación y calibración realizada pueden agruparse en dos grandes grupos: afinamiento en la reproducción de los histogramas de flujo cíclico, y mejoramientos en la operación traducidos en menor tiempo total consumido en la red, y disminución de detenciones frente a las líneas de paradas.

### 4.2 Representación de los perfiles de flujo cíclico.

En las figuras 2 y 3 pueden observarse como ejemplos de los ajustes producidos en la reproducción de histogramas de flujo cíclico, la situación preliminar y posterior tanto para autos como para buses sobre un enlace elegido al azar.

Aunque la reproducción no es perfecta, sin embargo, de todas maneras representa un claro mejoramiento con respecto a la situación inicial en que no se había validado la modelación de buses. Es necesario recalcar que aunque los principales cambios se realizaron sobre parámetros que incidían en la simulación de los buses, también la simulación de los autos experimentaba claros mejoramientos.

Esto último se debe a que hubo cambios en los enlaces modelados, y que la mejor modelación del desplazamiento de los buses permitió mejorar a su vez los histogramas de los autos.

### 4.3 Tiempo total consumido en la red.

Se realizó un análisis de covarianza para los datos recogidos de tiempo total consumido en la red.

En Willumsen y Coeymans (1987) puede obtenerse el análisis estadístico y los resultados desagregados obtenidos.

En la Tabla 1 se entrega un resumen de los porcentajes de reducción de tiempo total consumido en la red, de los diferentes escenarios estudiados, con respecto a la situación base.

El escenario 4 corresponde a la modelación y simulación afinada de buses, los otros escenarios corresponden a TRANSYT normal (escenario 1), TRANSYT con ciclo único forzado (escenario 2), y TRANSYT con algunos enlaces actuados por el tránsito (escenario 3).

De dicha tabla es posible inferir que realmente el escenario 4, es decir, la nueva modelación de buses representa en todos los casos un mejoramiento claro con respecto a los otros escenarios.

Los rangos de mejoramiento varían de un 12,7% a un 47,8%. En general, como puede observarse, la reducción es mayor para los autos que para los buses. Pero la explicación a esto radica en la modelación más realista

efectuada en término de enlaces y líneas de parada compartida, tanto para los autos como para buses.

#### 4.4 Paradas.

La función objetivo usada en TRANSYT en el presente estudio, se hizo igual a una combinación del valor social del tiempo y del costo de operación en la red.

La optimización que realice el modelo también afecta el número de paradas, por lo que se debió medir como variaba esta cifra en los diferentes escenarios. Esto se realizó midiendo en cada línea de parada la cantidad de autos y buses que debían detenerse en espera de la luz verde, cantidades que se transformaron en proporciones de vehículos que paran y que no lo hacen, de manera de no depender de las variaciones de flujo entre distintos días de medición.

El método estadístico usado para determinar si la nueva formulación del modelo traía consigo alguna mejoría o empeoramiento con respecto a los otros escenarios, fue realizar un Test-t para la diferencia de la proporción de paradas del resto de los escenarios y el último escenario formulado (escenario 4), exigiendo un nivel de significación del 5%. Esto se calculó en 15 líneas de paradas en forma independiente, distinguiendo autos y buses, en los distintos períodos definidos en el día.

Los resultados obtenidos luego de este análisis no arrojan una notoria disminución de la proporción de paradas. De la comparación del escenario 0 con el escenario 4, se puede apreciar que de los 108 casos en que se aplicó el test-t, el número de veces en que se pudo rechazar la hipótesis nula, de que no habría cambios, fue de 26 para los buses (en 23 casos disminuye la proporción de paradas y en 3 aumenta) y de 41 para los autos (en 22 casos se mejora y en 19 se empeora), siendo la magnitud de estas cifras similares. En el resto de los 108 casos no se puede concluir con un 5% de significancia que exista alguna mejoría o empeoramiento. Características similares se pudieron observar en las comparaciones con los otros escenarios.

Esto muestra que en el caso de los buses existe alguna mejoría en términos globales, que a costa de sacrificar tres casos, logra una ganancia en los otros 23. No así para los autos que en conjunto se obtiene que los empeoramientos compensan a las mejorías.

Algunas de las proporciones de paradas para el escenario 4 versus el 0 se dan en la tabla 2, en ella se muestran ambas cantidades para las distintas líneas de parada, y para los 4 períodos del día. Además incluye la diferencia entre ellas en el caso de ser significativas, y cero en caso contrario.

## 5. SOFTWARE PRODUCIDO.

Durante la investigación se estuvo en constante producción de programas que el estudio iba requiriendo, así mismo se modificaron programas ya existentes con el fin de amoldarlos a los propósitos que se necesitaban.

A continuación se detallan los cambios y creaciones de software más significativos.

### 5.1 Modificaciones a TRANSYT/8.

La gran mayoría de las modificaciones introducidas fueron producto del interés de replicar los perfiles de flujo (CFPs) modelados por TRANSYT y las observaciones directamente de terreno.

Las modificaciones introducidas son de dos clases: las primeras fueron destinadas a ampliar las funciones realizadas hasta ahora por TRANSYT con el fin de poder tener el control de algunas variables que se encontraban en estado de parámetros fijos, también se desviaron datos a archivos laterales con el propósito de rescatar información por ser procesada con estos programas. Los segundos cambios fueron la introducción de nuevas funciones de dispersión de pelotones (Gibson y Aguirre, 1984) para probar su comportamiento y dar al programa una mayor flexibilidad.

#### a) Variación global de la velocidad de los buses.

Una de las pruebas realizadas fue hacer uso de un parámetro que se suponía ponderaba la velocidad de todas los enlaces de la red. Esto es poder aumentar o disminuir en forma proporcional la velocidad de los vehículos de la red. Revisando el código de TRANSYT se pudo comprobar de que este programa sólo realizaba la reducción de las velocidades de los autos, por lo que se escribió el código necesario para que los buses también contaran con esta facilidad.

#### b) Para la dispersión de pelotones de vehículos livianos, TRANSYT da la opción de manejarla a través de un parámetro K que pondrá a RT (último dato de la tarjeta 31).

Los enlaces de buses no disponen de esta flexibilidad, es decir sus parámetros están fijos dentro del programa, no existiendo posibilidad de alterarlos desde el archivo de datos y control.

Para salvar este obstáculo se cambió el código a fin de incluir esta posibilidad. Por estar el modelo de dispersión de buses influído por dos parámetros (uno para el tiempo de parada y el otro para el tiempo de travesía) y como sólo se dispone en el archivo de datos de un espacio para colocarlos, se implementó una solución parecida a la usada para introducir la velocidad y el tiempo de parada de los buses. Esto es, agrupar ambas cifras en un valor "empaquetado" XXYY donde XX es el ponderador del tiempo de travesía e YY es el correspondiente al tiempo de parada. Este número al ser detectado por el programa lo desarma dando origen a los números buscados. Además se completó dando el código de manera que si este valor no

es rellenado o estan fuera de orden, se asigan los valores standard y por ultimo si se incluye un valor negativo realice una dispersión nula.

c) Verificación de adelantos , en la comparación de los perfiles de flujo de TRANSYT y las actividades del terreno.

Para realizar la tarea anterior se modificó el programa de manera de rescatar los perfiles de flujo modelados por TRANSYT. Con este fin los enlaces desde los cuales se quería extraer los valores que forman el perfil en cada intervalo (STEP) se deben especificar en la tarjeta 35 (la usada para obtener los gráficos de estos perfiles). El archivo de salida tiene la información de los perfiles de flujo de entrada a una línea de parada (INPROFILES), los perfiles de flujo de salida (OUTPROFILES), el número de enlace y el intervalo donde comienza el verde.

d) Introducción de la fórmula de Gibson para la dispersión de pelotones.

En la actualidad el modelo de dispersión usado por TRANSYT es el de Robertson. A fin de probar el funcionamiento de otra forma de interpretar el problema (Gibson y Aguirre, 1984) además de otorgar al TRANSYT una mayor versatilidad, se introduce el código necesario; éste es muy parecido a la rutina que maneja la modelación de Robertson pero las variables tienen conceptualmente otro significado.

Para darle un acceso expedito, se suprimió en la tarjeta 1 la variable que daba la opción de sacar más copias del archivo de salida y se cambió por la elección del modelo de dispersión a usar. Para usar Robertson se coloca un 0 (cero) o se deja el campo en blanco, si se desea usar Gibson en la dispersión de pelotones se coloca un 1 en dicho campo.

## 5.2 Programa de Recolección de Perfiles de Flujo en Terreno.

Para obtener los perfiles de flujo que se producen en terreno, es decir el verdadero comportamiento de los vehículos ante señales de tráfico, se confeccionó un programa en lenguaje base para ser ejecutado por microcomputadores EPSON-PX8. El programa recibe los parámetros de terreno, una línea de texto para describir el lugar de medición, largo del ciclo, largo del verde, largo de las intervalos que conforman un ciclo, y el número de intervalos que completan un ciclo. Luego mediante una tecla se da comienzo a la medición (esta se debe oprimir al iniciarse una señal verde) y luego conforme los vehículos van atravesando la línea de parada, el observador va oprimiendo teclas según el tipo de vehículo (autos, camiones, buses). El programa dependiendo de la tecla oprimida suma la observación al intervalo del momento (mediante comparaciones de tiempo) en el perfil de la categoría del vehículo.

## 5. SOFTWARE PRODUCIDO.

Durante la investigación se estuvo en constante producción de programas que el estudio iba requiriendo, así mismo se modificaron programas ya existentes con el fin de amoldarlos a los propósitos que se necesitaban.

A continuación se detallan los cambios y creaciones de software más significativos.

### 5.1 Modificaciones a TRANSYT/8.

La gran mayoría de las modificaciones introducidas fueron producto del interés de replicar los perfiles de flujo (CFPs) modelados por TRANSYT y las observaciones directamente de terreno.

Las modificaciones introducidas son de dos clases: las primeras fueron destinadas a ampliar las funciones realizadas hasta ahora por TRANSYT con el fin de poder tener el control de algunas variables que se encontraban en estado de parámetros fijos, también se desviaron datos a archivos laterales con el propósito de rescatar información por ser procesada con estos programas. Los segundos cambios fueron la introducción de nuevas funciones de dispersión de pelotones (Gibson y Aguirre, 1984) para probar su comportamiento y dar al programa una mayor flexibilidad.

#### a) Variación global de la velocidad de los buses.

Una de las pruebas realizadas fue hacer uso de un parámetro que se suponía ponderaba la velocidad de todas los enlaces de la red. Esto es poder aumentar o disminuir en forma proporcional la velocidad de los vehículos de la red. Revisando el código de TRANSYT se pudo comprobar de que este programa sólo realizaba la reducción de las velocidades de los autos, por lo que se escribió el código necesario para que los buses también contaran con esta facilidad.

#### b) Para la dispersión de pelotones de vehículos livianos, TRANSYT da la opción de manejarla a través de un parámetro K que pondera a RT (último dato de la tarjeta 31).

Los enlaces de buses no disponen de esta flexibilidad, es decir sus parámetros están fijos dentro del programa, no existiendo posibilidad de alterarlos desde el archivo de datos y control.

Para salvar este obstáculo se cambió el código a fin de incluir esta posibilidad. Por estar el modelo de dispersión de buses influído por dos parámetros (uno para el tiempo de parada y el otro para el tiempo de travesía) y como sólo se dispone en el archivo de datos de un espacio para colocarlos, se implementó una solución parecida a la usada para introducir la velocidad y el tiempo de parada de los buses. Esto es, agrupar ambas cifras en un valor "empaquetado" XXYY donde XX es el ponderador del tiempo de travesía e YY es el correspondiente al tiempo de parada. Este número al ser detectado por el programa lo desarma dando origen a los números buscados. Además se completó dando el código de manera que si este valor no

es relleno o están fuera de orden, se asigne los valores standard y por último si se incluye un valor negativo realice una dispersión nula.

c) Verificación de adelantos, en la comparación de los perfiles de flujo de TRANSYT y las actividades del terreno.

Para realizar la tarea anterior se modificó el programa de manera de rescatar los perfiles de flujo modelados por TRANSYT. Con este fin los enlaces desde los cuales se quería extraer los valores que forman el perfil en cada intervalo (STEP) se deben especificar en la tarjeta 35 (la usada para obtener los gráficos de estos perfiles). El archivo de salida tiene la información de los perfiles de flujo de entrada a una línea de parada (INPROFILES), los perfiles de flujo de salida (OUTPROFILES), el número de enlace y el intervalo donde comienza el verde.

d) Introducción de la fórmula de Gibson para la dispersión de pelotones.

En la actualidad el modelo de dispersión usado por TRANSYT es el de Robertson. A fin de probar el funcionamiento de otra forma de interpretar el problema (Gibson y Aguirre, 1984) además de otorgar al TRANSYT una mayor versatilidad, se introduce el código necesario; éste es muy parecido a la rutina que maneja la modelación de Robertson pero las variables tienen conceptualmente otro significado.

Para darle un acceso expedito, se suprimió en la tarjeta 1 la variable que daba la opción de sacar más copias del archivo de salida y se cambió por la elección del modelo de dispersión a usar. Para usar Robertson se coloca un 0 (cero) o se deja el campo en blanco, si se desea usar Gibson en la dispersión de pelotones se coloca un 1 en dicho campo.

## 5.2 Programa de Recolección de Perfiles de Flujo en Terreno.

Para obtener los perfiles de flujo que se producen en terreno, es decir el verdadero comportamiento de los vehículos ante señales de tráfico, se confeccionó un programa en lenguaje base para ser ejecutado por micro-computadores EPSON-PX8. El programa recibe los parámetros de terreno, una línea de texto para describir el lugar de medición, largo del ciclo, largo del verde, largo de los intervalos que conforman un ciclo, y el número de intervalos que completan un ciclo. Luego mediante una tecla se da comienzo a la medición (esta se debe oprimir al iniciarse una señal verde) y luego conforme los vehículos van atravesando la línea de parada, el observador va oprimiendo teclas según el tipo de vehículo (autos, camiones, buses). El programa dependiendo de la tecla oprimida suma la observación al intervalo del momento (mediante comparaciones de tiempo) en el perfil de la categoría del vehículo.

### 5.3 Programa de Acople de Perfiles de Flujo Modelados y Observados.

Este programa fue diseñado con el fin de superponer en un gráfico de barras de alta resolución los perfiles de flujos modelados por TRANSYT y los recolectados en terreno mediante micro-computadores.

Ya que el ciclo del semáforo está formada por intervalos (STEP) la superposición se realiza intervalo a intervalo por medio de barras con distinto anchurado (para esto es conveniente "correr" TRANSYT con una duración de intervalo igual a la usada en la recolección).

En las Fig. 2 y 3 se puede apreciar el tipo de gráficos producidos por este programa.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Las principales conclusiones y recomendaciones de este trabajo son las siguientes:

- a) Es rentable realizar el ejercicio de modelar afinadamente después de una formulación preliminar, el comportamiento de los enlaces de buses en TRANSYT
- b) Las ventajas producidas por esta modelación más afinada son tanto en términos de tiempo total consumido en la red como en paradas, y los mejoramientos se producen para los buses y también para los autos.
- c) Es importante, cuando se vaya a modelar vías arteriales como la utilizada en este estudio, emplear las definiciones introducidas en este trabajo para los porcentajes de buses que se detienen en paradero, los tiempos promedio de detención en ellos y los flujos de saturación con interferencia de áreas de paradero.
- d) Parece recomendable así mismo emplear la nueva forma de definir las velocidades libres sobre los arcos para los vehículos, en el caso de interferencias de áreas de paradero. La recolección automática con Journey Event Recorder, debe ser acompañada de un procesamiento computacional también automático y no artesanal como en este caso, a fin de ser coherente en todos los casos con las características que se ha hecho asumir a las velocidades libres en el presente estudio.
- e) Podría arguirse que no era necesaria una recolección intensa de CFP para producir los resultados de mejor simulación que se obtuvieron en esta investigación. Sin embargo, aunque se haya procedido correctamente en el empleo de las definiciones aquí entregadas, de igual manera es posible detectar que algunas mediciones no son tan fáciles de obtener de terreno. La observación de los CFP comparando lo simulado con lo real, permite afinar lo medido en terreno y llegar a una mejor aproximación.

Por otra parte, habría sido difícil llegar a la reformulación de la red, si en el proceso de calibración no se hubiera encontrado que la creación de un arco solo autos mejoraba la reproducción de los CPP.

- f) Es necesario cuando se enfrenta problemas de tráfico, no atenerse a las definiciones teóricas entregadas por los manuales y la experiencia de los países desarrollados. En cada situación, puede llegarse a una revisión de los conceptos empleados, porque lo que interesa no es el acuerdo con las definiciones sino el empleo de conceptos que permitan simular la realidad lo mejor posible.
- g) Se requiere realizar mayor investigación respecto a la dispersión de buses. El problema de varias paradas está provisoriamente resuelto, pero necesita mejoramiento.
- h) Una forma automática de calibración de TRANSYT a partir de CPP simulados y recogidos sería de indudable interés. Los mayores costos de una modelación como la anterior se compensarían absolutamente con los mayores beneficios producidos por la mejor representación de la realidad.

## 7. RECONOCIMIENTOS.

Este trabajo fué realizado gracias a la colaboración y financiamiento del TRRL de Inglaterra, del FONDECYT de Chile, y del DIUC (Dirección de Investigaciones de la Pontificia Universidad Católica de Chile). Así mismo, las siguientes personas trabajaron y colaboraron en la ejecución de esta investigación: Gladys Morton de UCL, Rodrigo Millán, Rubén Escudero, Luis Felipe Pesce y Jorge Valeze de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Numerosos estudiantes de esta última Universidad trabajaron en la recolección intensiva de datos de esta parte de la investigación como en el trabajo completo. El profesor Jaime Gibson de la Universidad de Chile nos ayudó con sus observaciones respecto de numerosos aspectos prácticos y teóricos.

Finalmente, no habría sido posible la realización de este trabajo sin la eficaz y gratuita colaboración de AUTER Ltda que facilitó los equipos de controladores Ferranti empleados en terreno, así como de la Ilustre Municipalidad de Santiago que en todo momento prestó su apoyo esta investigación.

## REFERENCIAS

COEYMAN, J.E. (1986) Evaluación de sistemas de control de tráfico: consideraciones metodológicas y prácticas. Actas IV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte, Santiago.

COEYMAN, J.E y WILLUMSEN, L.G. (1986) Adapting TRANSYT to conditions in developing countries. Proceedings PTRC Summer Annual Meeting. PTRC Education and Research Services Ltd., London.

DAWSON, J.A.L. (1982) Traffic control system for Great Santiago. Technical Report, Secretaría Ejecutiva de la Comisión de Transporte Urbano, Santiago.

GERLOUGH, D.L. y HUBER, M.J. (1975) Traffic Flow Theory. Special Report 165 Transportation Research Board, Washington, DC, USA.

GIBSON, J. y AGUIRRE J.F. (1984). Replanteamiento del modelo de dispersión de tráfico de Robertson. Actas del primer congreso chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile, Santiago.

THOMPSON, A.A. (1986) The implementation of ATC systems in developing countries. Proceedings Second IEEE Conference on Road Traffic Control, London.

VINCENT, R.A., MITCHELL, A.I. y ROBERTSON, D.I. (1980). User Guide to TRANSYT version 8. TRL Laboratory Report 888, TRL, Crowthorne, Berks, UK.

WILLUMSEN, L.G. y COEMANS, J.E. (1987) Research into the Value of Area Traffic Control techniques in a Developing Country. Final Report TRRL Contract TRR 842/415, Transport Studies Group, University College, London.

Tabla N° 1 Porcentaje de reducción en el tiempo total consumido en la red bajo cada escenario

Periodo	Escenarios			
	1	2	3	4
1 (7:30 - 8:30)	.			
Autos	14.6 *	14.0	15.3	28.8
Buses	19.9 *	14.7	13.3	23.7
2 (8:30 - 9:00)	.			
Autos	13.9	8.7 *	3.6 *	15.5
Buses	6.7 *	9.0 *	8.3 *	14.8 *
3 (16:30-18:00)	.			
Autos	-6.7 *	25.7	28.7	40.6
Buses	-18.6	-2.3 *	2.4 *	12.7 *
4 (18:00-19:30)	.			
Autos	6.7 *	22.4 *	22.1	47.8
Buses	-14.5	-3.2 *	5.7 *	17.6

Nota (\*) La reducción no es estadísticamente significativa al 5%

Ecclesiastes 6:9-10

Autos

Tabla 2: Ejemplo porcentaje reducción de paradas

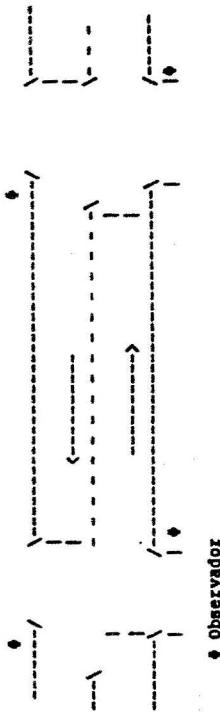


Figura N° 1 Ubicación de los observadores recolectando datos para CPP.

CARS - CPP094.DAT / LINKS: 1N - 1113  
 19/03/96 17:13:25 RECOLTEA / LASTIN / N -> S  
 (19/03/96 17:13:25 RECOLTEA / LASTIN / N -> S)

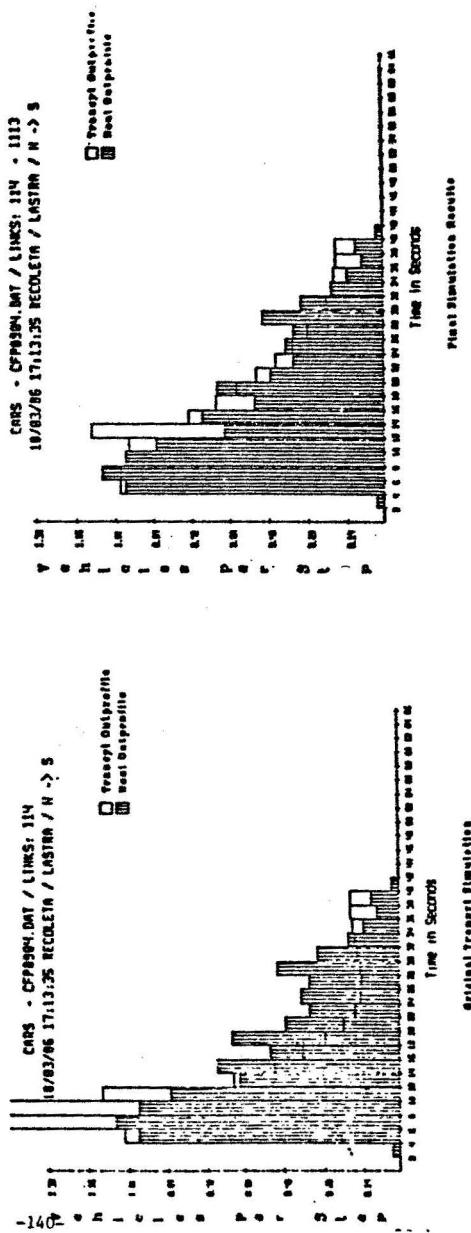


Fig. 2: CPP de autos simulados y observados

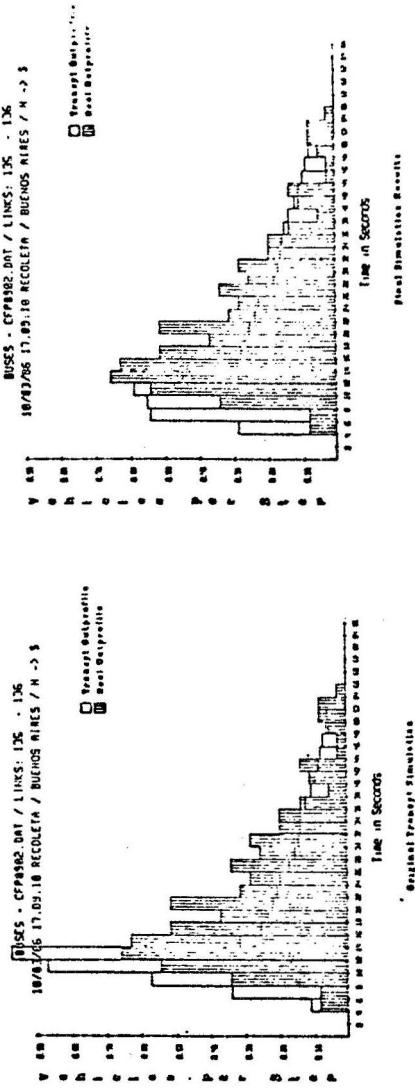


Fig. 3: CFP de buses simulado y observado

$R_1$  = RANGO PARA CALCULO DE VELOCIDAD  
 PRIMITIVA  
 $R_2$  = RANGO PARA CALCULO DE VELOCIDAD  
 NUEVA

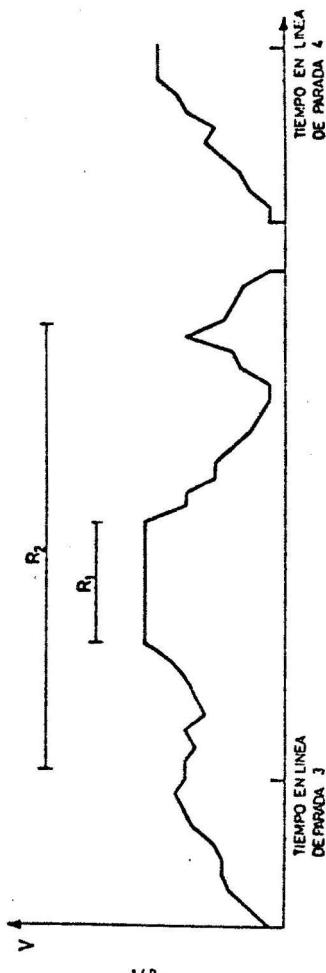
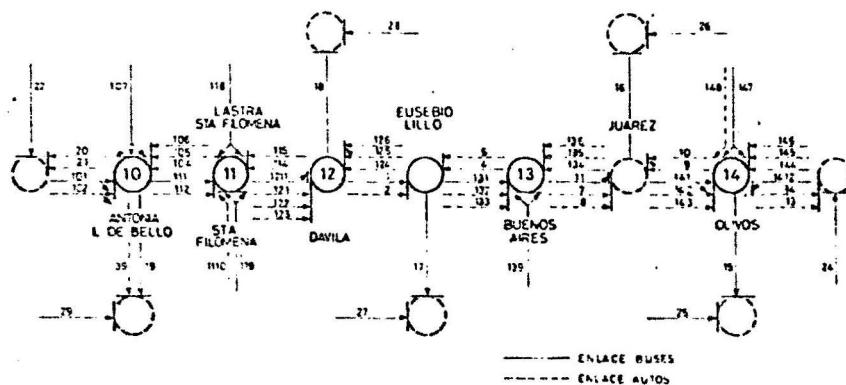
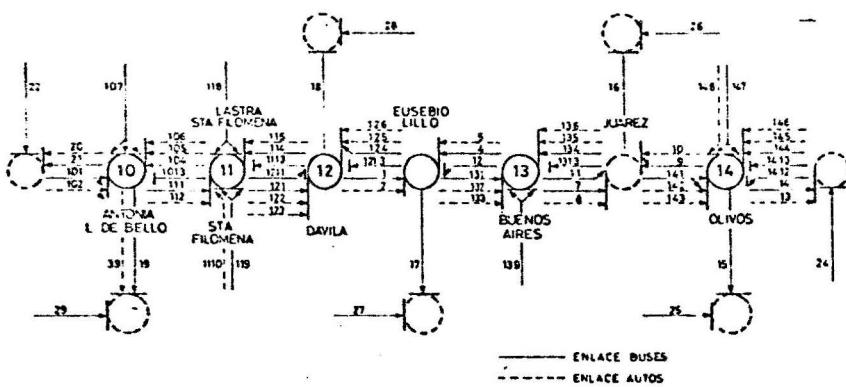


Fig. 4: Velocidades primitivas y nuevas de buses



## RED PRIMITIVA DE TRANSYT



## RED FINAL DE TRANSYT

Fig. 5: Redes de TRANSYT empleadas