

## LA CALIBRACION Y AFINAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TRANSITO

Fernando Jofré Weiss  
Unidad Operativa de Control de Tránsito  
Santa Beatriz 319, Santiago

José Orlandini Robert  
SONDA  
Compañía 1357, Santiago

### RESUMEN

Una gran cantidad de ciudades del mundo tienen Sistemas de Control de Área de Tráfico que permiten supervisar y coordinar la mayoría de los semáforos existentes a través de planes de tiempos prefijados. Por el contrario, el control dinámico de redes de semáforos es una técnica de desarrollo relativamente reciente. Existen evidencias de que algunos sistemas dinámicos han logrado un mejor funcionamiento que la operación con planes de tiempos fijos. En particular, algunas evaluaciones llevadas a cabo en el Reino Unido han mostrado que la técnica de control SCOOT ha logrado ahorros en demoras de un 12% en promedio sobre planes de tiempo fijo actualizados y calculados con TRANSYT. Sin embargo, estos resultados han sido obtenidos en ciudades con una baja participación de locomoción colectiva y con tráfico relativamente homogéneo. De ahí, el interés de realizar un proyecto de implementación de una experiencia piloto, a fin de poder comparar ambas estrategias de control en un contexto como el de Santiago.

Este trabajo presenta el desarrollo de esta experiencia que se ha llevado a cabo en un sector de las comunas de Providencia y Las Condes, y la que ha contemplado, entre otras cosas, la habilitación de un centro de control, la instalación de equipos de control capaces de operar con planes prefijados y con el sistema de control dinámico SCOOT, y de redes de comunicación entre la Sala de Control y cada uno de los controladores. En este documento se hace una presentación general del proyecto, una descripción de las estrategias de control de planes prefijados y del sistema dinámico, y de las actividades de validación de SCOOT. Finalmente, se analizan las tareas relativas a la sintonía fina de SCOOT y se formulan algunos planteamientos a considerar posteriormente en el mejoramiento del sistema.

## 1. INTRODUCCION.

Las autoridades metropolitanas en muchas grandes ciudades del Tercer Mundo se encuentran estudiando la instalación de sistemas modernos de control de tráfico, a fin de reducir los problemas de congestión y las externalidades negativas asociadas a esta última. Es así, como sistemas integrales de control de tránsito urbano ya existen en ciudades como Ciudad de México y Sao Paulo y otras están empezando a instalarlos (Beijing).

En nuestro país, los técnicos del sector han venido planteando ya desde hace algún tiempo la introducción en el Gran Santiago de este tipo de técnicas en las instalaciones semaforizadas existentes. Un estudio realizado hace 10 años delineó un plan para un sistema intensivo de control de tránsito, que comprendiera tanto áreas de control por tiempo fijo como áreas de tiempo flexible, para controlar la gran mayoría de las intersecciones semaforizadas en el Gran Santiago. Sin embargo, en dicha oportunidad se determinó, a pesar de lo atractivo del proyecto (la rentabilidad social oscilaba entre 200% y 300% dependiendo del área de la ciudad), la conveniencia de investigar más profundamente algunos aspectos, para poder decidir la técnica de control más apropiada a las condiciones locales. En esa línea, y a partir de un financiamiento del Banco Mundial, la Intendencia de la Región Metropolitana llamó a licitación a fines del año 1988 a un proyecto denominado "Implementación de Experiencia Piloto de Sistemas de Control de Tránsito". Este proyecto se encuentra en su fase final de desarrollo, habiéndose completado ya las tareas de puesta en marcha y de validación del sistema dinámico.

## 2. DESCRIPCION DEL PROYECTO.

### 2.1 Generalidades y Descripción del Sistema de Control.

La zona del proyecto comprende Providencia y Nueva Providencia entre Miguel Claro y Apoquindo con Málaga, Andrés Bello entre Pedro de Valdivia y Vitacura, Santa María entre Pedro de Valdivia y Puente El Cerro, Vitacura entre Andrés Bello y Providencia, y Tobalaba entre Providencia y Lota. Se trata en general de vías de alta capacidad, algunas con un uso de suelo bastante intenso, tránsito heterogéneo entre sí (alta proporción de locomoción colectiva en el caso de Providencia, Nueva Providencia y Apoquindo, y nula en el caso de Andrés Bello), y una vía con una gran demanda y, además, tránsito reversible como Av. Andrés Bello. Existen limitaciones importantes como los puentes sobre el río Mapocho y la reducida capacidad de almacenamiento de algunas calles transversales entre Providencia y Nueva Providencia. Los flujos son fuertes en los períodos punta, con marcada variación por sentido entre mañana y tarde, y relativamente menores el resto del día. Todas estas características hacen que la zona sea particularmente adecuada para un experimento con los objetivos mencionados.

Hay en la zona 40 intersecciones semaforizadas, pero sólo 33 equipos de control de semáforos, pues 7 de ellos controlan un total de 14 intersecciones. Los controladores son marca Plessey T-200, Ferranti Serie I y Auter A-3F, y todos ellos cumplen con las Especificaciones de Controladores de Tráfico de la Unidad Operativa de Control de Tránsito. Todos estos equipos están dotados de unidades de comunicación e interconectados al computador central del Sistema (PDP11/83), a través de líneas telefónicas dedicadas. En el computador principal del Sistema se ejecuta el software de control de planes fijos y dinámico (SCOOT). Este último obtiene información de sensores inductivos que recogen información de flujos vehiculares. Estos sensores consisten en espiras instaladas a 50 mm. bajo el pavimento, que permiten detectar el paso de vehículos a través de la variación del valor de la inductancia. El total de espiras instaladas alcanza aproximadamente a 200 y ellas se encuentran localizadas al comienzo de cada uno de los arcos existentes en la red.

Los datos de control necesarios para modificar o mantener los diversos estados individuales de los semáforos, ya sea que estén en control centralizado dinámico o de planes prefijados, son ensamblados en mensajes por el computador y transmitidos a todas las unidades de comunicación externas cada segundo. Esta información se compone de un número de bits (hasta 16), cada uno de los cuales efectúa una función específica en la unidad externa, como por ejemplo, modificar o mantener una fase determinada, sincronizar el reloj del controlador, activar una señal de tráfico, etc. A su vez, cada segundo se recibe en el computador central un mensaje de respuesta desde cada unidad de comunicación. Estos mensajes contienen bits que señalan fallas en la transmisión de datos, estado de los controladores y detectores, la información de detectores, todo lo cual es permanentemente analizado por el computador. Cualquier falla en la transmisión de datos es almacenada por el computador y un número excesivo provocará que este último aisle la unidad de comunicación y todos los equipos conectados a ella. Esto también puede ocurrir como resultado de ciertas fallas de los equipos o respuestas no satisfactorias.

## 2.2 Control Centralizado por Planes Fijos.

Los planes de tiempos fijos, que se deben determinar con las técnicas usuales, se almacenan en la base de datos del sistema y se implementan conforme a lo establecido en las tablas de eventos del sistema. Este tiene disponibilidad de 24 planes de tiempos fijos y tres tipos de tablas de tiempo: hora del día, día de semana y día del año.



## **2.3 Control Dinámico SCOOT.**

### **2.3.1 Aspectos Generales.**

La técnica de control dinámica SCOOT fue desarrollada en el Reino Unido a fines de la década de los 70, en un trabajo conjunto del TRRL con las tres mayores empresas británicas de control de tráfico. Los objetivos básicos del desarrollo del proyecto SCOOT fueron fundamentalmente los siguientes:

- reducir las demoras, número de detenciones y niveles de congestión por bajo los niveles alcanzados por los mejores sistemas de tiempos fijos.
- obviar la necesidad de actualizar los planes prefijados.
- proveer información para propósitos de gestión de tráfico.

La estructura de SCOOT es similar a la utilizada por el programa TRANSYT de cálculo de planes de tiempo fijo. Ambos métodos emplean lo que se ha denominado "un modelo de tráfico", que predice las demoras y detenciones causadas por una programación particular de los semáforos. En el caso de TRANSYT, el modelo es "off-line", en el sentido que las predicciones de demoras y detenciones son el resultado de flujos promedios históricos especificados. El modelo SCOOT es "on line", en el sentido que las predicciones de demoras y detenciones son recalculadas unos pocos segundos después de las últimas mediciones de tráfico. El propósito fundamental del modelo de tráfico SCOOT es predecir los efectos en el tráfico de alteraciones a los tiempos existentes.

### **2.3.2. El modelo SCOOT.**

Las espiras inductivas detectoras de vehículos están localizadas en los accesos de todas las intersecciones semaforizadas que están bajo control SCOOT, pero ubicadas lo más alejado posible de las líneas de detención. Ellas recogen datos 4 veces por segundo, y éstos son registrados, procesados y almacenados en perfiles de flujo cíclicos en cada arco. Los valores en estos perfiles son afectados por la presencia de vehículos, así como también por el flujo vehicular. Estos perfiles contienen la información necesaria para decidir cómo mejorar la coordinación de pares adyacentes de semáforos, así como también la información de la demanda para la definición de los tiempos de verde. Asimismo, el sistema conoce el estado y duración de las luces en cada uno de los arcos, y utilizando una serie de otros parámetros de datos asociados a los arcos, tales como el tiempo de viaje, flujo de saturación, capacidad de almacenamiento, pérdida en la partida y ganancia de amarillo, SCOOT predice el valor de la cola en cada línea de parada, para lo cual considera un modelo de dispersión similar al utilizado por TRANSYT. La congestión se mide directamente desde los detectores. Si el detector se ubica más allá del término normal de vehículos en una calle, éste no será nunca cubierto por tráfico estacionario, excepto en casos de congestión.

### 2.3.3 Optimizadores de SCOOT.

El propósito del modelo de tráfico es predecir el impacto de diferentes programaciones de semáforos en la calle. Se utilizan tres optimizadores independientes para optimizar los repartos, los desfases y los tiempos de ciclo. Los optimizadores de SCOOT y Transyt son también similares, en el sentido que ambos realizan automáticamente pequeñas alteraciones a los tiempos de semáforos existentes e implementan sólo aquellas que el modelo de tráfico predice que son beneficiosas. Sin embargo, los optimizadores de SCOOT operan en tiempo real y aquellas alteraciones beneficiosas son implementadas directamente en la calle, mientras que un nuevo plan de tiempo fijo debe ser transferido, antes de ser usado, a la biblioteca de planes almacenada en el computador.

#### a. Optimizador de reparto.

El optimizador de reparto opera en el modelo de tráfico justo antes de cada cambio de fase. En dicho momento, considera el efecto de aumentar, mantener o reducir la duración de la luz verde actual. Para ello, analiza el grado de saturación de todos los enlaces controlados por el nodo, entendiéndose el grado de saturación como la razón entre el flujo promedio y el flujo máximo que puede pasar por la línea de detención. El optimizador de reparto procurará minimizar el grado máximo de saturación en los arcos que llegan al nodo, a fin de minimizar las demoras. Si hay congestión en los accesos al nodo, el optimizador de reparto deberá tomarla en cuenta. Para que ello sea posible, el optimizador calcula un indicador por acceso formado por un término que representa la congestión y otro que refleja el grado de saturación.

#### b. Optimizador de desfase.

El optimizador de desfase utiliza los Perfiles de Flujo Cíclicos para predecir una vez por cada ciclo la longitud de las colas para todos los arcos aguas arriba y aguas abajo de un determinado nodo vial. Para estos arcos, se predice el efecto de "mantener" o "mover" el tiempo del nodo en cuestión ligeramente hacia adelante o hacia atrás. Como en los perfiles se indica la hora de llegada del tráfico a la línea de detención, estas predicciones pueden usarse para minimizar las detenciones y demoras en la mini-área. La congestión de un enlace se considera también en el optimizador de desfase, de manera que se da prioridad a un enlace congestionado sobre otro sin congestión. El grado de prioridad varía según el grado de congestión. El objetivo del optimizador es minimizar un índice de performance compuesto por demoras, detenciones y nivel de congestión.

#### c. Optimizador de Ciclo.

SCOOT opera áreas de semáforos en un tiempo de ciclo común (denominadas regiones), a fin de mantener la coordinación entre ellos. El optimizador de ciclo funciona cada cinco minutos, y en dicha oportunidad calcula el grado de saturación existente en todas

las líneas de detención. Si alguna de las líneas de detención presenta una saturación por sobre el 90% se aumenta el tiempo de ciclo en una cantidad pequeña. Si todas se encuentran por debajo del 90%, el tiempo de ciclo se reduce. SCOOT tiene una facilidad adicional para que el optimizador funcione al doble de la frecuencia, cuando se observa una tendencia ascendente o descendente de los flujos. Asimismo, para reducir las demoras en intersecciones con muy baja carga, el optimizador de ciclo tiene la facilidad para forzar que estas intersecciones operen en "doble ciclo", si esta medida reduce la demora total en la red.

### 3. VALIDACION DEL SISTEMA DINAMICO SCOOT.

Esta actividad se refiere al proceso de calibración del modelo SCOOT, de modo que éste represente adecuadamente lo que está ocurriendo en la calle. La cuantificación inicial de los parámetros de datos SCOOT deberá ser seguida por una etapa de sintonía fina de los valores, pues se ha demostrado que no es suficiente llevar a cabo una validación básica y dejar después que SCOOT opere libremente.

#### 3.1 Parámetros.

Cada arco del sistema debe ser validado independientemente. Idealmente, el proceso toma normalmente alrededor de dos horas por cada uno. Los parámetros que deben ser validados en cada arco son los siguientes:

- Tiempo de viaje
- Cola Máxima permitida
- Pérdida en la partida
- Ganancia de amarillo
- Flujo de saturación
- Arco Principal aguas abajo
- Desfase por defecto

Los cuatro primeros parámetros deben ser validados antes que el flujo de saturación, e incluso, estos cuatro valores pueden ser calculados antes que el sistema SCOOT sea instalado. Una vez que la validación en una región ha sido completada, es probable que el único valor que requiera un cambio posterior sea el flujo de saturación durante la etapa de sintonía fina. Posteriormente, sólo es necesario chequear algunos valores una vez al año para verificar si todavía son válidos. Evidentemente, si el arco sufre modificaciones en su perfil o se introducen variaciones en el diseño operativo del semáforo, entonces todos aquellos arcos que han sido afectados deben ser calibrados nuevamente.

#### 3.2 Planificación de la actividad de validación.

Existen una serie de aspectos que fue necesario considerar en la etapa de validación:



En primer término, dado que la validación requiere establecer comunicación por radio entre el computador y la calle, fue necesario formar un equipo de trabajo rotatorio de 4 personas, 2 de las cuales se desplazaban a terreno y 2 permanecían en la Sala de Control. Asimismo, con el objeto de evitar interferencias fue necesario utilizar un solo canal de comunicación. El equipo de terreno debía contar también con lápices, formularios de validación, cronómetros y contadores de vehículos.

La primera tarea previa a la validación consistió en la calibración de los detectores. Ella se refiere a la verificación de que cada uno de ellos se encuentra funcionando y que está conectado correctamente al arco correspondiente. Para ello, el observador debía comparar el flujo sobre el detector con el despliegue del computador, para lo cual era razonable esperar una demora típica de 3 segundos entre el instante en que el vehículo cruzaba la espira y el instante en que el vehículo aparecía en el despliegue del computador. Un vehículo viajando a 50 kph debería registrar un pulso de cerca de 0.75 segundos, mientras el de un bus debería ser probablemente 1.5 segundos.

En el trabajo de validación, se comenzó con arcos simples localizados en tramos de la red sin problemas de congestión, preferiblemente arcos de entrada. Una vez que se obtuvo experiencia, se avanzó hacia arcos más complejos dejando para el final Av. Andrés Bello, por la complejidad derivada de su tránsito reversible. Asimismo, en muchos casos no fue posible validar ciertos arcos en algunos períodos del día, ya sea porque existía muy poco o demasiado tráfico.

### 3.3 Validación de los parámetros.

A continuación, se describe la metodología de validación de los diversos parámetros utilizada en cada uno de los arcos de la red:

#### 3.3.1 Tiempo de Viaje (JNYT).

Es el tiempo que transcurre desde que un vehículo, en el interior de un pelotón, en condiciones de circulación libre, es detectado por las espiras SCOOT al comienzo del arco, hasta el instante en que cruza la línea de detención. El modelo SCOOT usa este valor para determinar las llegadas a la línea de parada, para lo cual considera un modelo de dispersión similar al utilizado por TRANSYT. Cuando se trata de arcos cortos, un solo observador puede medir este valor, en cambio, cuando el arco es largo, se requerirán dos personas comunicadas por radio. Para cada arco se deben tomar alrededor de 10 mediciones, y en lo posible, ellas deben incluir una muestra representativa de los tipos de vehículos que circulan por dicho arco. Después de las 10 lecturas, se deben analizar los resultados y descartar aquellos valores que estén muy desviados. Finalmente, el tiempo de viaje validado corresponde al promedio de las mediciones consideradas válidas.

### 3.3.2 Cola Máxima Permitida (MAXQ).

Este parámetro corresponde al número máximo de vehículos que puede ser contenido en ese arco entre la línea de parada y el detector. SCOOT usa este valor para restringir la cantidad de cola modelada por cada arco, y también para un chequeo de consistencia si existe congestión. Para la mayoría de los arcos, es aceptable calcular este valor como:

$$- \quad \text{MAXQ} = \frac{\text{longitud arco} \times \text{N}^{\circ} \text{ de pistas}}{6}$$

para lo cual se ha supuesto que la mayoría de los vehículos en cola ocupan una distancia de 6 metros. En el caso de arcos cortos (arcos en los cuales una cola normal formada durante la luz roja cubre el detector), este valor es crítico por los posibles problemas de bloqueo y debe ser determinado cuidadosamente.

### 3.3.3 Pérdida en la Partida (SLAG).

La pérdida en la partida para cada arco es el tiempo en segundos que transcurre desde el comienzo de una fase SCOOT hasta que el primer vehículo que está detenido cruza la línea de parada. Este tiempo es usado en el modelo como el tiempo desde que parte la fase SCOOT hasta que la cola en el modelo comienza a descargarse desde la línea de detención a la tasa de descarga (STOC). En consecuencia, este tiempo va desde que aparece el amarillo en la fase previa hasta que el primer vehículo detenido en el arco cruza la línea de parada. Este valor resultó típicamente igual al tiempo de enterverde más 2 o 3 segundos, aun cuando se constató que puede variar dependiendo de muchos factores tales como la pendiente, presencia de peatones, composición del tráfico, etc.

### 3.3.4 Ganancia de Amarillo (ELAG).

Este parámetro corresponde al tiempo que transcurre desde que termina una fase SCOOT hasta que el tráfico termina de pasar sobre la línea de detención. SCOOT usa este valor en el modelo para determinar cuándo un arco se va a rojo y los vehículos ya no continúan descargándose. De acuerdo a los resultados obtenidos en terreno, en general este valor resultó ser de 3 segundos, pues los vehículos usualmente continúan descargándose durante todo el período amarillo de 3 segundos.

### 3.3.5 Flujo de Saturación (STOC).

Este parámetro corresponde a la tasa de descarga del arco en la línea de detención medida en Link Profile Units (LPU). El modelo usa este valor para determinar cuán rápidamente los vehículos se descargan cuando el arco está en verde. Este es probablemente el parámetro más difícil de entender y medir. Si el valor final no es suficientemente preciso, entonces SCOOT no reflejará correctamente lo que está pasando en la calle. Por ejemplo, si STOC es muy bajo, entonces SCOOT registrará una cola, cuando en realidad no existe en



la calle. En cambio, si STOC es demasiado alto, entonces SCOOT no registrará cola, cuando en la práctica sí la hay. El valor del flujo de saturación se obtiene a través de un proceso iterativo, que consiste en lo siguiente:

En primer lugar, se deben medir los valores del tiempo de viaje, cola máxima permitida, start lag y end lag, correspondientes a dicho arco y, luego, estimar e implementar un valor inicial de STOC. En general, los valores deberían estar en los siguientes rangos, de acuerdo a la experiencia inglesa:

- 1 pista : STOC entre 8 y 12 LPU/seg
- 2 pistas: STOC entre 13 y 16 LPU/seg
- 3 pistas: STOC entre 17 y 22 LPU/seg
- 4 pistas: STOC entre 23 y 27 LPU/seg

Posteriormente, una vez que se han cargado en la base de datos del sistema los valores de estos parámetros, se implementa SCOOT en el nodo y se deja el optimizador de reparto en condición "limbo" (es decir, operando fuera de línea). Asimismo, en el nodo ubicado inmediatamente aguas arriba se deberá deshabilitar el optimizador de desfase, para evitar que SCOOT implemente una buena progresión en el arco, que haga difícil la acumulación de vehículos en cola en la línea de parada, lo cual es requerido para poder hacer las mediciones. Finalmente, se debe verificar en cada arco la consistencia entre la información de luces contenida en el mensaje M14 del modelo con lo que se observa en terreno.

En este momento, puede iniciarse el proceso de validación del STOC. Para ello, el equipo de personas de terreno debe medir en cada ciclo del semáforo el tamaño de la cola (en número de vehículos) al comienzo del verde de ese arco y el tiempo de despeje de todos los vehículos demorados (en segundos). El esquema de trabajo seguido por el equipo de terreno fue el siguiente: un observador era el responsable de medir la cola, grabar su longitud e identificar el último vehículo demorado (no necesariamente un vehículo detenido, sino eventualmente aquel que ha debido disminuir significativamente su velocidad debido a la cola existente). A su vez, el segundo observador era el responsable de medir el tiempo de despeje de la cola, para lo cual cronometraba desde el instante en que la luz se ponía verde hasta el momento en que el último vehículo demorado cruzaba la línea de detención.

Paralelamente, en cada ciclo de semáforo, el modelo SCOOT entrega una serie de mensajes que se detallan a continuación, los que se deben comparar con los valores obtenidos en sitio:

- M08: este mensaje es desplegado al final del período verde que le corresponde al arco en proceso de calibración y muestra el número de vehículos en cola que queda en la línea de parada. Si la cola se despeja completamente en el período de verde, entonces este mensaje mostrará 0 cola.

- M10: este mensaje del modelo de tráfico de SCOOT muestra la longitud de la cola existente (en LPU) en la línea de parada al comienzo del período verde de ese arco.
- M11: este mensaje muestra la magnitud de tiempo (en seg:) estimada por el modelo para que se descargue la cola. Si un arco determinado no se descarga durante el verde, entonces al final de este período aparece un -1.
- M14: este es un mensaje que se lista cada 4 segundos y muestra el largo de la cola, el final de la cola y si el arco está en verde o rojo.

Una vez que se ha ganado experiencia, es posible que el ingeniero de tráfico manipule los optimizadores y los STOCs en otros arcos, a fin de mejorar la validación del arco en el que se está trabajando. Si durante la etapa de validación, el modelo ha acumulado cola debido a que el valor inicial de STOC fue muy bajo, se deberá aumentar fuertemente el STOC para despejar la cola completamente en el modelo, para luego definir un valor más real. El proceso iterativo de estimación del valor de STOC para ese arco deberá continuar hasta que se obtengan tres mediciones coincidentes o cercanas del tiempo de despeje de la cola. De acuerdo a lo observado durante la validación, un ingeniero experimentado en SCOOT es capaz de alcanzar el STOC correcto en aproximadamente 5 lecturas, en cambio, un novicio generalmente tomaba 20 ó 30 lecturas antes de lograr un valor aceptable.

En el anexo final se presenta un ejemplo de algunos de los valores alcanzados en los flujos de saturación en diferentes vías. En el cuadro 1 se detallan los flujos de saturación obtenidos en Nueva Providencia (4 pistas). Allí puede observarse que los valores están comprendidos entre 20 y 27 lpu/seg. El mayor valor se alcanza en la intersección con Miguel Claro y los menores valores en Pedro de Valdivia y Ricardo Lyon, por la existencia en estos últimos de importantes paraderos de locomoción colectiva, un uso de suelo muy intenso con gran demanda de estacionamientos y fuerte presencia peatonal, y significativos virajes a la derecha e izquierda respectivamente. En el cuadro 2 se presenta un resumen de los flujos de saturación de Av. Santa María (3 pistas). En este caso, los valores obtenidos son muy similares y están en el rango entre 19 y 20 lpu/seg. El cuadro 3 muestra los resultados alcanzados en el eje Vitacura (2 pistas). En este caso, los valores resultantes fluctúan entre 12 y 15 lpu/seg, siendo el menor valor el obtenido en la intersección de Vitacura con Isidora Goyenechea, donde existe un paradero de relativa importancia. Finalmente, el cuadro 4 muestra los flujos de saturación de Av. El Bosque (1 pista). Aquí, los valores están entre 11 y 13 lpu/seg.

En resumen, los resultados obtenidos en la validación de los flujos de saturación son similares a los alcanzados en otras calibraciones de SCOOT en el Reino Unido, excepto los casos de algunos arcos del eje Providencia-Nueva Providencia, con paraderos importantes de locomoción colectiva, donde resultaron significativamente menores.

### 3.3.6 Arco Principal Aguas Abajo (MDL).

El arco principal aguas abajo de un determinado arco corresponde a aquel que recibe el mayor aporte de flujo de él. Su validación es generalmente materia de simple observación cualitativa.

### 3.3.7 Desfase por defecto (DO).

El desfase por defecto de un arco corresponde al tiempo que transcurre desde el instante en que un vehículo de un pelotón cruza la línea de detención del arco ubicado aguas arriba, hasta el momento en que cruza la línea de detención del arco en cuestión. Este desfase es usado por el modelo en el caso de fallas en los detectores asociados al arco. En general, se estimó como el tiempo de viaje en el arco (JNYT) más 5 segundos.

## 4. SINTONIA FINA DEL SISTEMA DE CONTROL DINAMICO.

### 4.1 Objetivos.

Esta tarea se refiere a la puesta a punto del sistema SCOOT, una vez que se ha completado el trabajo de validación en una región. Este trabajo comenzó recientemente, por lo que sólo se presentará en líneas generales el procedimiento que se está siguiendo.

### 4.2 Sintonía fina de repartos.

Dado que los arcos han sido validados por diferentes personas, algunas con más experiencia que otras, y en diferentes períodos del día, es necesario realizar ajustes al STOC. Para ello, la metodología que se ha utilizado es la de implementar SCOOT secuencialmente en cada nodo que se desea analizar, verificando que los repartos de verde generen grados de saturación balanceados, lo cual debe compararse con los valores de grado de saturación estimados por el mensaje S03 del modelo de tráfico, para cada uno de los arcos que acceden a él. En los casos que el modelo ha indicado para un arco grados de saturación mayores que 90%, tal situación se ha chequeado cuidadosamente en terreno. Asimismo, se ha implementado el mensaje M11 y se han comparado los valores estimados por el modelo con los tiempos de despeje de cola de alguno de los arcos que acceden al nodo. Una vez que el observador se encuentra satisfecho con los resultados obtenidos, se continua con el siguiente nodo.

Adicionalmente, se ha puesto especial atención en aquellos nodos con fases dependientes de la demanda y en cuán bien SCOOT modela su no aparición, como es el caso de los cruces de Av. Santa María y algunos de Av. Andrés Bello.



#### 4.3 Sintonía fina de desfases.

Una vez que todos los repartos de los nodos han sido chequeados, se debe implementar SCOOT en todos los nodos de la región y observar todos los desfases que se generan, verificando si se logra una buena progresión, particularmente en calles de un sentido o en calles de dos sentidos en las que existe un fuerte flujo en un sentido. Es difícil darse cuenta de un error menor en el tiempo de viaje cuando se trabaja en la etapa de validación, pero éste resulta obvio cuando el nodo está totalmente optimizado. Asimismo, se deben comparar los perfiles de llegada en cada línea de detención con el mensaje M14 del modelo de tráfico y con el diagrama VEGA de SCOOT, correspondiente a dicho arco.

#### 4.4 Sintonía fina del tiempo de ciclo.

La manera más rápida para encontrar nodos que podrían estar mal validados consiste en observar el mínimo tiempo de ciclo práctico para cada nodo de la región, y analizar aquellos que están condicionando el tiempo de ciclo de ésta. El tiempo de ciclo mínimo para un nodo es el valor mínimo en el cual éste podría operar, no sobrepasando un grado de saturación de 90%. Asimismo, es necesario analizar cuidadosamente aquellas intersecciones en las cuales el STOC es demasiado bajo, por cuanto ellas frecuentemente están demandando un tiempo de ciclo más alto que el necesario. De acuerdo a los análisis realizados, el período más adecuado para verificar los tiempos de ciclo es justo antes o después de un período peak. Otro aspecto que es necesario considerar durante esta etapa corresponde al análisis de la factibilidad de implementar ciclos dobles en algunas intersecciones de la región, a fin de minimizar la demora total en la red.

### 5. CONSIDERACIONES FINALES.

Se ha verificado que la validación del modelo de tráfico de SCOOT es un ejercicio relativamente más simple que el trabajo en terreno requerido para la generación y calibración de los planes de tiempo fijo, y que utiliza considerablemente menos personal. En proyectos de gestión de tránsito llevados a cabo recientemente, se ha requerido en promedio 5 hombres-día por intersección para completar el desarrollo de los planes de tiempo fijo. En cambio, la validación de SCOOT, en este caso, necesitó aproximadamente 2 hombres-día por intersección. Adicionalmente, la otra gran diferencia radica en que la validación de SCOOT puede ser realizada por un equipo pequeño de personas desplazándose de un sitio a otro en un período de varias semanas; mientras que la investigación de planes de tiempo fijo generalmente requiere un gran equipo, en un período concentrado de tiempo. Consecuentemente, es más fácil planificar y encontrar los recursos requeridos en la tarea de validación de SCOOT.

Es indudable que en los próximos meses, existen una serie de aspectos que será necesario continuar analizando, a fin de optimizar el sistema de control dinámico. Ellos se refieren a un estudio más detallado de los tiempos de ciclo, repartos y desfases que implementa SCOOT. En particular, por ejemplo, investigar una mejor definición del rango de tiempos de ciclo mínimo y máximo en cada región (considerando que en algunas áreas con importante actividad peatonal como Providencia, puede ser deseable intentar definir un valor más bajo que 120), dejar que el optimizador de ciclo opere sin restricciones, esto es, que SCOOT defina libremente si un nodo debe operar en ciclo simple o doble, el análisis de posibles mejoramientos de la coordinación a través del uso de ponderadores en arcos, etc.

También, se estima necesario realizar un análisis exhaustivo que reconsidere la localización de algunas espiras, a fin de que ellas capten la información real de los flujos en los arcos correspondientes. Asimismo, analizar la posibilidad de disponer, en ciertos arcos, de detectores diferenciados de medición de flujos y de congestión.

A pesar de las dificultades encontradas durante las etapas de puesta en marcha y validación, la experiencia ha resultado exitosa. Se ha logrado cumplir con el objetivo de la experiencia, cual era el de implementar un sistema centralizado que permitiera controlar a través de planes fijos y a través de SCOOT las intersecciones semaforizadas de la red piloto. En consecuencia, es posible analizar ahora en forma empírica la estrategia de control que mejor se adapta a las condiciones locales, es decir, a las variaciones en los flujos, composición del tráfico, conducta de los usuarios y características de la red vial urbana. Por esta razón, constituye un precedente técnicamente indispensable para la correcta elección del sistema de control de tráfico que habrá de proveerse para la ciudad en el corto plazo.

Desde antes de la implementación del proyecto, han existido aprensiones en cuanto a que SCOOT pueda efectivamente tratar adecuadamente el comportamiento de buses en vías con flujos sustantivos de locomoción colectiva. Al respecto, cabe señalar que el estudio de evaluación de la experiencia piloto que comenzará próximamente deberá abordar con gran énfasis la investigación y análisis de las adaptaciones que sea necesario realizar en el programa de control dinámico, a fin de ajustarlo a las condiciones locales, y el desarrollo de las capacidades para tratar corrientes vehiculares heterogéneas.

Finalmente, la gran importancia del proyecto radica, además, en que junto con permitir aumentar el conocimiento y comprensión local de estas técnicas, se ha logrado formar una base de expertos locales que puede contribuir a diseñar, implementar y mantener en debida forma estos sistemas cuando ellos se implementen masivamente.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo sólo ha sido posible realizarlo gracias a la colaboración del personal de la Unidad Operativa de Control de Tránsito y de la firma Sonda. Especial mención debe hacerse a Marisa Kausel y Manuel Albornoz, por su gran dedicación durante las tareas de puesta en marcha y validación del sistema.

### REFERENCIAS

Bretherton, R.D., Bowen G.T., Burton, P.G. y Wood, K. The use of SCOOT for traffic management. Proc., 2nd Int. Conference on Road Traffic Control (IEE Conf. Pub. N° 260) Institution of Engineers, London, 1986.

Gorton, P.T. (1991) Scoot User Guide, Siemens Plessey Controls Limited, 1991.

Hunt, P.B., Robertson, D.I., Bretherton, R.D. y Winston, R.I. (1981) SCOOT: a traffic responsive method of coordinating signals. Report LR 1014, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Hunt, P.B., Robertson D.I., Bretherton R.D. y Royle M.C. (1982). The SCOOT on line traffic signal optimisation technique, IEE's Road Traffic Signalling Conference, London, 1982.

Ross P. y Gibson J. (1987). Comparación experimental del control dinámico y por planes prefijados de una red de semáforos en el centro de Santiago. Actas del Tercer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad de Concepción, 18-20 de Noviembre de 1987, Concepción.



CUADRO 1

EJE PROVIDENCIA - NUEVA PROVIDENCIA (poniente - oriente)

CRUCE	ARCO	Nº Pistas	STOC (Lpu/ seg)	f <sub>o</sub> (Lpu/ veh)	Flujo de saturación (veh/hr)
E.Yañez /M.Claro	1111C	4	27	13.1	7420
M.Claro /M.Montt	1122L	4	27	13.1	7420
M.Montt /A.Varas	1141C	4	25	13.1	6870
A.Varas /C.Antúnez	1151G	4	22	13.1	6046
C.Antúnez /M.Pereira	1152C	4	26	13.1	7145
M.Pereira /P.Valdivia	1212G	4	20	14.6	4932
P.Valdivia /G.Vieja	1232C	4	24	14.6	5918
G.Vieja /R.Lyon	1252G	4	21	14.6	5178
R.Lyon /Suecia	1272C	4	25	14.6	6164

CUADRO 2

EJE AV. SANTA MARIA (poniente - oriente)

CRUCE	ARCO	Nº Pistas	STOC (Lpu/ seg)	f <sub>o</sub> (Lpu/ veh)	Flujo de saturación (veh/hr)
C.Casanueva /P.Valdivia	2311C	3	20	13.2	5454
P.Valdivia /Pte.Letelier	2321K	3	20	13.2	5454
Pte.Letelier/Pte.El Cerro	2331C	3	19	13.2	5182

CUADRO 3

EJE VITACURA (poniente - oriente)

CRUCE	ARCO	Nº Pistas	STO (Lpu/ seg)	f <sub>o</sub> (Lpu/ veh)	Flujo de saturación (veh/hr)
Encomenderos/I.Goyenechea	2221G	2	12	18.7	2310
I.Goyenechea/Pdte.Riesco	2231C	2	15	18.7	2888
Pdte.Riesco/A.Bello	2241F	2	14	18.7	2695

CUADRO 4

EJE EL BOSQUE (sur - norte)

CRUCE	ARCO	Nº Pistas	STOC (Lpu/ seg)	f <sub>o</sub> (Lpu/ veh)	Flujo de saturación (veh/hr)
C.Silva /Lota	1531F	1	11	17.2	2308
Lota /Tobalaba	1511K	1	13	17.2	2721

