

## OPTIMIZACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE SEMÁFOROS CONSIDERANDO FLUJO DE VEHÍCULOS VERSUS FLUJO DE PERSONAS

Jorge Ordenes, Universidad de Chile, joordenes@ing.uchile.cl  
Alejandro Tirachini, Universidad de Chile, alejandro.tirachini@ing.uchile.cl

### RESUMEN

La programación óptima de semáforos es una herramienta importante para la mitigación de los problemas de tráfico. En redes multimodales, el transporte público puede hacer un uso más eficiente del espacio; en este trabajo se considera una red simple en que automóviles y buses comparten el derecho de vía, para analizar el efecto que tiene en la programación óptima de los semáforos el considerar la demora de los vehículos versus considerar la demora de las personas, obtenida a través de ponderar el flujo vehicular por las tasas de ocupación. Se estima el ahorro de tiempo de viaje de buses cuando se incluye el flujo de personas y se analiza la relación entre este ahorro y frecuencia óptima de buses, el costo de operadores y el costo de los usuarios.

*Palabras claves: semáforos, programación, tiempo de viaje, optimización, frecuencia de buses*

### ABSTRACT

Optimal signal setting is an important tool for the mitigation of traffic problems. In multimodal networks, public transport can be more efficient in the use of road space; this work uses a simple network in which cars and buses share the right of way, to analyze the effect on optimal signal settings of including vehicle delays or people delays (obtained by weighting vehicle flows by occupancy rates) in the objective function to be minimized. We estimate the bus travel time savings due to considering passenger trips and we analyze the implications of this policy for optimal bus frequency, operator cost and user cost.

*Keywords: traffic signals, travel time, optimization, bus frequency*

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la programación de semáforos ha generado un gran interés debido a su relación directa con la formación de colas y el aumento o disminución de demoras para vehículos y personas en redes urbanas. Uno de sus puntos principales es la interacción entre la programación de semáforos y los flujos, tanto de transporte público como de transporte privado. En particular, un tema que atrae la atención de muchos investigadores es cómo se puede disminuir los tiempos de viaje del transporte público a través de la programación de semáforos. Esto ha hecho que en la literatura especializada y en la práctica se proponga varios esquemas de prioridad de buses en intersecciones y vías.

Gardner *et al.* (2009) plantea que las medidas a aplicar pueden separarse en físicas, controladas por semáforo, e integradas. Dentro de las medidas físicas se tienen las que involucran a los arcos, como pistas solo bus en el mismo sentido de flujo, pistas solo bus en contra del sentido del flujo y corredores exclusivos de buses. Las medidas controladas por semáforo involucran el uso de semáforos de programación pasiva (optimizados y coordinados, pero con el mismo ciclo y fases en todo el periodo) o de semáforos actuados (varían sus ciclos y fases dentro del mismo periodo). Las medidas integradas agregan medidas físicas y de semáforo. Un ejemplo de medida integrada es el “pre-semáforo”, que en su forma más común consiste en un semáforo aguas arriba del semáforo principal, solamente para transporte privado, de forma tal que buses puedan adelantarse al semáforo principal sin tener la misma luz roja de los automóviles.

En vías con alta frecuencia de buses, se complica la aplicación de algunas medidas, como es el adelantamiento de la fase de verde si aparece un bus. Es por esto que Furth *et al.* (2010) propone otras estrategias de control dependiendo de las características de la intersección (capacidad, grado de saturación, demanda, etc): cambiar los planes de coordinación de los semáforos para priorizar los buses, mejorar los desfases y flexibilizar los planes de control de algunos semáforos permitiendo modificar las fases. En una aplicación a Boston, Massachusetts, se disminuyó las demoras de 90 a 44 segundos por bus en un total de siete intersecciones. En esta red se aplicaron acumulativamente tres medidas: primero prioridad pasiva, seguido de extensión del verde y verde temprano, para finalmente terminar con inserciones de nuevas fases y rotación de ellas. El 79% de las mejoras del sistema se alcanzó con la implementación de las medidas de prioridad pasiva, lo cual destaca la relevancia de generar buenos planes de control de semáforos que favorezcan a los buses, sin comprometer significativamente el rendimiento de la red en su conjunto.

En redes multimodales en las que automóviles y vehículos de transporte público comparten el uso de las vías, es esperable que la programación óptima de los semáforos sea distinta si se considera la minimización de demoras basada en vehículos, que cuando se incluye la tasa de ocupación de los vehículos en el cálculo de demoras, con el objetivo de minimizar la demora de las personas directamente. En ese sentido, la priorización de buses será más beneficiosa si el objetivo es minimizar la demora de las personas, en lugar de minimizar la demora de los vehículos. En Ma *et al.* (2014) se postula un modelo de maximización de la capacidad de intersecciones basado en las personas sujeta a restricciones de asignación de vía, flujo, rendimiento y programación de semáforos, es decir, se considera explícitamente que un bus tiene una mayor tasa de ocupación y eficiencia en el uso del espacio que un automóvil. Se obtiene que

a partir de la maximización basada en personas, los buses son favorecidos más que los autos, dado la cantidad de personas que llevan.

Es importante considerar las diminuciones en las demoras que puedan ocurrir debido a la coordinación de semáforos. Gibson *et al.* (2014) calibró un modelo, en el cual se estima empíricamente el efecto de la coordinación de semáforos en reducir la demora en intersecciones de los buses. Se encontró además que las detenciones de buses en paraderos generaban una pérdida de beneficio de la coordinación, es decir, en promedio las detenciones en paraderos aumentan las demoras en intersecciones. Esto muestra la importancia de considerar las detenciones en paraderos en la programación de redes de semáforos

En este trabajo se plantea llevar la discusión anterior a la operación actual de buses de Santiago, mediante el estudio de la programación óptima de semáforos que considere detenciones de buses en paraderos y las distintas tasas de ocupación de buses y automóviles. Se elige una red simple de dos intersecciones en la Avenida Blanco Encalada, para la cual se cuenta con datos detallados de flujos por tipo de vehículo y movimiento, tasas de ocupación, tiempos de viaje y tiempos de detención en paraderos. Se utiliza dos software para la solución del problema: Aimsun 8 y Transyt 15. Se compara los resultados de programación óptima de la red de semáforos considerando la minimización de las demoras de personas versus la minimización de las demoras de vehículos, y además se estudia el efecto de las detenciones en paraderos en la programación. Se estima y analiza el efecto en los tiempos de viaje del transporte público y el transporte privado, y se discute potenciales impactos en el diseño de oferta de líneas de buses, en términos de frecuencia de servicio (bus/h).

El trabajo se divide en seis secciones. La Sección 2 presenta la metodología a ocupar y las herramientas utilizadas en esta investigación. La Sección 3 presenta los escenarios a estudiar, mientras la Sección 4 muestra los resultados y su respectivo análisis. En la Sección 5 se presenta líneas futuras de la investigación y finalmente se termina con la sección de conclusiones.

## 2. METODOLOGÍA

Se estudia una red lo más simple posible, en la avenida Blanco Encalada en la comuna de Santiago, donde se tiene información de flujos vehiculares, tasas de ocupación de buses y automóviles, y tiempo de detención de buses en paraderos (valores promedio y variabilidad), tomada en un día laboral de abril de 2014 en la Punta de la Tarde. Utilizando los software Aimsun 8 de simulación de tráfico, y Transyt 15 de programación óptima de semáforos, se optimizará una red simple de dos semáforos -ciclo óptimo, repartos de verde y desfase - bajo distintos supuestos de tiempo de detención en paraderos y peso específico de los buses en la programación. En particular, se analizará cómo los desfases y repartos óptimos son sensibles a la operación y demanda de buses en el corredor y el flujo de buses. En investigación futura se analizará el efecto de la ubicación de paraderos y los tiempos de servicio de pasajeros.

## 2.1 Modelación de la red

En primera instancia, es necesario analizar la validez de los modelos de ambos programas. Se decidirá cuales generan una mejor representación de los buses y autos. A continuación se presenta los modelos ocupados por cada uno de los programas computacionales:

### 2.1.1 Aimsun

Aimsun trabaja a partir de dos modelos: modelo de seguimiento vehicular y modelo de cambio de pista. El primero de basa en Gipss (1981), el cual tiene dos componentes, aceleración y desaceleración. Esto está definido a partir de la velocidad que los vehículos pueden alcanzar, para un vehículo  $n$  durante un intervalo  $(t, t + T)$  se define de la siguiente forma:

$$V(n, t + T) = \text{Min}[V_a(n, t + T), V_b(n, t + T)] \quad (1)$$

Donde  $V_a$  corresponde a la máxima velocidad que el vehículo puede alcanzar, dependiente de las condiciones de conducción y preferencias del conductor. Se define de la siguiente forma:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2,5a(n)T \left( 1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (2)$$

$V(n, t)$  es la velocidad del vehículo  $n$  en el tiempo  $t$ .

$V^*(n, t)$  es la velocidad deseada del vehículo  $n$  en la posición actual.

$a(n)$  es la máxima aceleración del vehículo  $n$ .

$T$  es el tiempo de reacción.

Y  $V_b$  corresponde a la máxima velocidad que el vehículo alcanza, dado que existe un vehículo que lo antecede. Se define de la siguiente forma:

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2T^2 - d(n) \left[ 2(x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)) - V(n, t)T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right]} \quad (3)$$

$d(n)(< 0)$  es la máxima desaceleración deseada por el vehículo  $n$ .

$x(n, t)$  es la posición del vehículo  $n$  en el tiempo  $t$ .

$x(n-1, t)$  es la posición del vehículo que va adelante ( $n-1$ ) en el tiempo  $t$ .

$s(n-1)$  es el largo efectivo del vehículo ( $n-1$ ).

$d'(n-1)$  es la estimación de la desaceleración deseada por el vehículo ( $n-1$ ).

Además, dado que es un modelo de seguimiento vehicular, debe existir un líder, el cual define su velocidad a partir del mínimo entre máxima velocidad deseada (dependiente de la aceptación de la velocidad máxima) y máxima velocidad permitida. El modelo de cambio de pista se basa en Gipps (1986a,b) y se modela como un proceso de evaluación de beneficios y factibilidad. Estos

beneficios se estudian a partir de los largos de cola y velocidad entre pistas en cada uno de los pasos de simulación (tiempo de reacción).

### 2.1.2 Transyt 15

Transyt trabaja con dos tipos de modelos, el modelo de optimización, que permite obtener tiempos de verde y ciclos óptimos, y el modelo mesocópico de tráfico. La función objetivo de Transyt busca minimizar una suma ponderada de demoras y detenciones, y se representa de la siguiente manera:

$$PI = \sum_{i=1}^N \left( W \cdot w_i \cdot d_i + \frac{K}{100} \cdot k_i \cdot s_i \right) \quad (4)$$

$W$  es el costo promedio de la demora

$w_i$  es el ponderador de la demora en el arco  $i$ .

$d_i$  es la demora en el arco  $i$ .

$K$  es el costo promedio de 100 detenciones.

$k_i$  es el ponderador de detenciones en el arco  $i$ .

$s_i$  son las detenciones en el arco  $i$ .

El modelo de optimización permite trabajar con dos tipos de algoritmos: Hill Climbing (HC) y Simulated Annealing (SA). El primero de ellos corresponde a una heurística matemática de búsqueda local. El segundo es una meta-heurística para problemas de optimización global. En teoría, el SA permitirá tener una mejor solución para el problema, sin embargo, Maher (2011) confirma que la función PI tiene múltiples mínimos locales, por lo cual encontrar el óptimo global es muy complejo.

Con respecto a los modelos de tráfico, Transyt tiene disponible dos modelos con diferentes funciones: Platoon Disperssion Model (PDM) ocupado para modelación de tráfico en arcos largos y Cell Transmision Model (CTM) ocupado para la modelación en arcos cortos. El modelo de tráfico PDM se basa en que el comportamiento de los flujos al salir de las intersecciones lo hacen en forma de pelotones que se van dispersando a medida que avanzan. Para determinar el flujo en cada intervalo, Transyt ocupa la siguiente fórmula recursiva:

$$q^1(k + t) = F \cdot q_k \cdot p + (1 - F) \cdot q^1(k + t - 1) \quad (5)$$

$q_k^1$  es el flujo de llegada en el intervalo  $k$ .

$q_k$  es el flujo de entrada en el intervalo  $k$ .

$p$  es la proporción de flujo de entrada a ese arco.

$t$  es el tiempo de viaje entre líneas de parada.

$F$  es el coeficiente de dispersión.

El coeficiente de dispersión se define de la siguiente forma:

$$F = \frac{1}{1 + \left(\frac{Kt}{100}\right)} \quad (6)$$

$K$  es valor del coeficiente de dispersión.

Además Transyt tiene un modelo especial para dispersión de buses, el cual está definido de la siguiente forma:

$$F = \frac{1}{1 + 0.7b + 0.15t} \quad (7)$$

$t$  es el tiempo promedio de crucero.

$b$  es el tiempo promedio de detención de un bus en un paradero.

Cabe destacar que al ser un modelo macroscópico de tráfico, no modela las ubicaciones exactas de los paraderos, repartiendo el tiempo de detención entre todo el arco. Según Gibson y Aguirre (1984) este factor de dispersión es inconsistente y no modela de buena manera la dispersión de buses.

El principal problema del modelo PDM es que permite la existencia de colas infinitas, por lo que desprecia todos los efectos de bloqueos y por lo tanto puede ser poco realista especialmente en arcos cortos. Por otro lado, CTM, propuesto por Daganzo (1994,1995), sí considera largos de cola y bloqueos. El modelo CTM discretiza cada arco en bloques; el tráfico se mueve entre los bloques de acuerdo a funciones flujo demora, haciendo un equilibrio entre el bloque anterior y el siguiente. Tanto detenciones, colas y demoras se calculan de la misma manera que en PDM, sin embargo el grado de saturación se calcula basado en la disponibilidad de verde que existe considerando los bloqueos aguas arriba de la intersección. Según Maher (2011) el uso de CTM puede mejorar hasta en un 20% la solución óptima del problema, y la principal causa, es que PDM al no modelar efectos de bloqueo genera una pérdida de beneficio de hasta un 40% en coordinación de semáforos.

### 2.1.3 Link Transyt-Aimsun

Esta herramienta permite realizar el trabajo conjunto e iterativo entre Aimsun y Transyt, es decir, permite que Transyt ocupe sus modelos de optimización de programación utilizando los modelos de tráfico de Aimsun, que al ser de microsimulación son mucho más detallados que los modelos mesoscópicos de Transyt, además se consideran efectos de bloqueos, detenciones en paraderos en puntos específicos y posibilidad de cambios de pista en cualquier punto del arco. Por ejemplo, la variabilidad de los tiempos de detención de buses en paraderos puede ser modelada en Aimsun, y por consiguiente en el link Aimsun-Transyt de manera de ser considerada en la programación óptima de semáforos, sin embargo es ignorada si solo se utiliza Transyt para la optimización de programaciones.

## 2.2 Descripción de la red

Los datos para la modelación de esta red fueron tomados el martes 15 de Abril del 2014 en periodo Punta Tarde, entre 18:30 y 19:30 horas. Se midieron flujos por movimiento y tipo de vehículos, tasas de ocupación de buses y autos, y tiempos de detención de buses en paraderos. La Figura 1 muestra una representación de la red con la que se trabajará, la cual tiene una extensión aproximada de 420 metros de Este a Oeste.

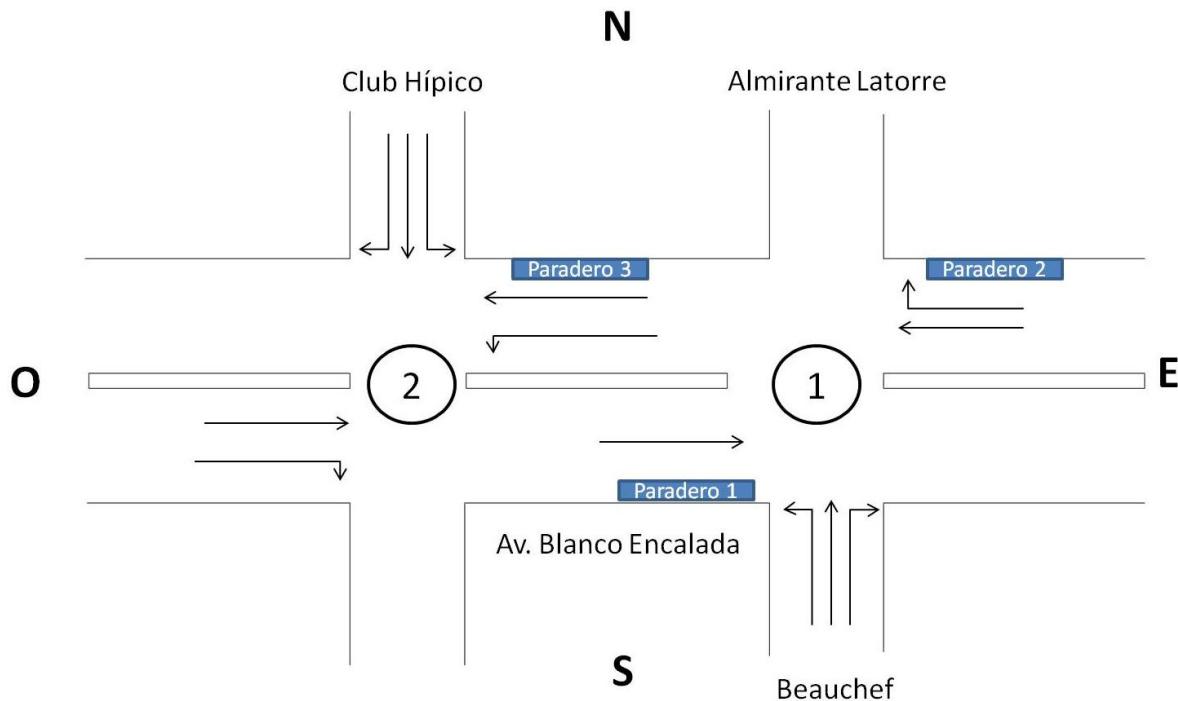


Figura 1: Red Blanco Encalada

A continuación se presentan las matrices origen destino obtenidas a partir de las mediciones:

**Tabla 1: Matriz OD Autos**

Autos/h	O	N	E	S
O	-	-	1399	546
N	204	-	134	708
E	1943	128	-	83
S	230	427	63	-

**Tabla 2: Matriz OD Camiones**

Camiones/h	O	N	E	S
O	-	-	47	3
N	4	-	6	11
E	29	-	-	1
S	2	1	1	-

**Tabla 3: Matriz OD Buses**

Buses/h	O	N	E	S
O	-	-	51	-
N	10	-	-	9
E	58	-	-	-
S	3	-	-	-

**Tabla 4: Matriz OD Minibuses**

Minibuses/h	O	N	E	S
O	-	-	13	-
N	2	-	-	5
E	14	-	-	-
S	1	1	-	-

Los tiempos de detención promedio con sus respectivas desviaciones estándares se muestran a continuación:

**Tabla 5: Tiempos de detención de buses en paraderos**

Paradero	Tiempo de detención promedio [s]	Desviación estándar [s]
Blanco/Beauchef	22	10
Blanco/Almirante Latorre	21	10
Blanco/Club Hípico	19	12

En las Tablas 6 y 7 se presentan las tasas de ocupación promedio, y su equivalencia por personas que existe entre buses y autos respectivamente:

**Tabla 6: Tasas de ocupación**

Dirección	Ocupación bus [pax/bus]	Ocupación autos [pax/auto]
Este-Oeste	60	
Oeste-Este	38	1,5

**Tabla 7: Relación tasas de ocupación**

Dirección	Tasa de equivalencia de personas [autos/bus]
Este-Oeste	40
Oeste-Este	25

Además, se utilizó el método de las patentes para medir tiempos de viaje y calibrar la red. A continuación se muestra el tiempo de viaje obtenido por tipo de vehículo en la Avenida Blanco Encalada en la dirección Oeste-Este:

**Tabla 8: Tiempos de viaje medidas**

Vehículo	Tiempo de viaje promedio [s]
Auto	70
Bus	106

Los parámetros de calibración fueron la velocidad de crucero en el caso de Transyt y en Aimsun, se calibró Velocidad deseada máxima y Aceleración máxima.

Finalmente, la Unidad Operativa de Control de Tráfico (UOCT) facilitó las programaciones de los semáforos de la red para dicho periodo. Notar que la intersección 2 tiene tres fases, al permitirse el viraje este-sur:

**Tabla 9: Programación actual**

Ciclo [s]	Desfase [s]	Tiempos de verde [s]				
		Int 1: Beaucheff - Blanco		Int 2: Club Hípico - Blanco		
		Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 3
104	5	38	42	44	36	9

Es necesario mencionar tres puntos con respecto a las programaciones:

- Las fases 1 corresponden a las calles en la dirección Norte-Sur.
- El desfase de 5 segundos, corresponde a los inicios de las Fases 2, correspondiente a Blanco Encalada (se inicia 5 segundos antes el verde de Club Hípico).
- En el caso de Club Hípico, el movimiento de vehículos Este-Oeste tiene un verde de 45 segundos, correspondientes a la suma de la Fase 2 y 3.

### 2.3 Escenarios

Se compara los siguientes escenarios:

- *Veh*: Optimizar función objetivo considerando demoras de vehículos (solo incluye diferencia entre buses y automóviles por tamaño de vehículos).
- *Per*: Optimizar función objetivo considerando demoras de personas (incluye diferencias por tasa de ocupación entre buses y automóviles)

A partir de estos escenarios, se procederá a realizar lo siguiente en cuanto al uso de las herramientas computacionales:

- Modelar ambos escenarios en Transyt 15 obteniendo resultados de demoras y tiempos de viaje.
- Modelar ambos escenarios usando link Transyt-Aimsun obteniendo resultados de demoras y tiempos de viaje desde Aimsun.
- Simular las programaciones óptimas obtenidas en Transyt, utilizando Aimsun, para realizar comparación de su comportamiento en cuanto a rendimiento en la red, relativo al resultado obtenido con el link Transyt-Aimsun

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Escenarios con Transyt

Los tiempos de verde, desfases y ciclos óptimos entregados por Transyt resultaron ser los siguientes:

**Tabla 10: Programaciones obtenidas con Transyt**

Caso	Ciclo [s]	Desfase [s]	Tiempos de verde [s]				
			Int 1: Beaucheff - Blanco		Int 2: Club Hípico - Blanco		
			Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Actual	104	5	38	42	44	36	9
Veh	87	4	33	46	30	34	8
Per	87	3	30	49	30	34	8

**Tabla 11: Razones de verde obtenidas con Transyt**

Caso	Razones de verde				
	Int 1: Beaucheff - Blanco		Int 2: Club Hípico - Blanco		
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Actual	0,37	0,40	0,42	0,35	0,09
Veh	0,38	0,53	0,34	0,39	0,09
Per	0,34	0,56	0,34	0,39	0,09

Se observa que, con respecto a la situación actual, existe una disminución del tiempo de ciclo de un 17%, mientras las razones de verde para el eje Blanco (Fase 2) aumentan considerablemente entre la situación actual y el caso de Veh o Per. Además, al tener el mismo ciclo óptimo la optimización por Veh con la de Per, se observa que efectivamente genera una mejora para los buses considerar tasas de ocupación. También se hace notar que el desfase disminuye, generando mayor beneficio en el tramo más cargado, esto explicado por el periodo de Punta Tarde en el cual la mayor cantidad de personas viaja de Este a Oeste (Tabla 6). Los tiempos de viajes a lo largo del eje Blanco Encalada se muestran a continuación:

**Tabla 12: Tiempos de viaje Oeste-Este**

Caso	TV Auto OE [s]	TV Bus OE [s]
Actual	70	106
Veh	60	98
Per	60	97

**Tabla 13: Tiempos de viaje Este-Oeste**

Caso	TV Auto EO [s]	TV Bus EO [s]
Actual	64	90
Veh	54	82
Per	54	82

**Tabla 14: Variación tiempos de viaje Oeste-Este**

Variación	$\Delta TV$ Auto OE [%]	$\Delta TV$ Bus OE [%]
Actual -Veh	14,29	7,55
Actual -Per	14,29	8,49
Veh-Per	0,00	1,02

**Tabla 15: Variación tiempos de viaje Este-Oeste**

Variación	$\Delta TV$ Auto EO [%]	$\Delta TV$ Bus EO [%]
Actual -Veh	15,63	8,89
Actual -Per	15,63	8,89
Veh-Per	0,00	0,00

Se observa que en ambos sentidos se genera una disminución del tiempo de viaje para ambos tipos de vehículo, pero en el sentido Oeste-Este se produce una mayor disminución de los tiempos de viaje del bus al optimizar considerando las tasas de ocupación de estos. La variación en las demoras de toda la red (incluye movimientos por accesos Beauchef y Club Hípico) se muestra en las Tablas 16 y 17.

**Tabla 16: Demoras totales obtenidas con Transyt**

Caso	Demora Autos [PCU-hr/hr]	Demora Buses [PCU-hr/hr]	Demora Total [PCU-hr/hr]
Actual	53,15	2,18	55,33
Veh	43,04	1,78	44,82
Per	43,12	1,73	44,85

**Tabla 17: Variación demoras totales**

Variación	$\Delta$ Demora Autos [%]	$\Delta$ Demora Buses [%]	$\Delta$ Demora Total [%]
Actual -Veh	19,02	18,35	19,00
Actual -Per	18,87	20,64	18,94
Veh-Per	-0,19	2,81	-0,07

Se observa una disminución de las demoras tanto en la optimización por Veh como por Per. Lo interesante resulta al comparar los escenarios Veh y Per, ya que la demora de automóviles se mantiene prácticamente igual pero la demora de buses disminuye 2.8% cuando se optimiza Per.

### 3.2 Escenarios con Link Transyt-Aimsun

Los repartos de verde, desfases y ciclos óptimos encontrados con el Link Transyt-Aimsun se presentan en las Tablas 18 y 19:

**Tabla 18: Programaciones obtenidas con Link Transyt-Aimsun**

Caso	Ciclo [s]	Desfase [s]	Tiempos de verde [s]				
			Int 1: Beaucheff - Blanco		Int 2: Club Hípico - Blanco		
			Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Actual	104	5	38	42	44	36	9
Veh	84	3	30	46	31	30	8
Per	88	-1	30	50	30	35	8

**Tabla 19: Razones de verde obtenidas con Link Transyt-Aimsun**

Caso	Razones de verde				
	Int 1: Beaucheff - Blanco		Int 2: Club Hípico - Blanco		
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Actual	0,37	0,40	0,42	0,35	0,09
Veh	0,36	0,55	0,37	0,36	0,10
Per	0,34	0,57	0,34	0,40	0,09

Se observa una disminución del tiempo de ciclo de un 19% y 15% para Veh y Per respectivamente. Como es esperable, las Fases 2 se ven beneficiadas con la optimización, de hecho, al optimizar considerando tasas de ocupación la razón de verde es aún mayor. Además se observa cambios en el desfase para el sentido Este-Oeste, de hecho, al optimizar por Per el desfase se invierte y la fase 2 comienza 1 segundo antes en la intersección de Beauchef, con respecto a la intersección de Club Hípico. Esto se explica por el mayor flujo de pasajeros de bus en el sentido Este-Oeste. A continuación se muestra las variaciones en tiempo de viaje:

**Tabla 20: Tiempos de viaje Oeste-Este**

Caso	TV Auto OE [s]	TV Bus OE [s]
Actual	65	107
Veh	59	103
Per	57	82

**Tabla 21: Tiempos de viaje Este-Oeste**

Caso	TV Auto EO [s]	TV Bus EO [s]
Actual	61	99
Veh	58	94
Per	57	92

**Tabla 22: Variación tiempo de viaje Oeste-Este**

Variación	$\Delta TV$ Auto OE [%]	$\Delta TV$ Bus OE [%]
Actual -Veh	9,23	3,74
Actual -Per	12,31	23,36
Veh-Per	3,39	20,39

**Tabla 23: Variación tiempo de viaje Este-Oeste**

Variación	$\Delta TV$ Auto EO [%]	$\Delta TV$ Bus EO [%]
Actual -Veh	4,92	5,05
Actual -Per	6,56	7,07
Veh-Per	1,72	2,13

Al comparar los escenarios Veh y Per, se encuentra beneficios en reducción de tiempo de viaje en el eje Blanco superiores a los beneficios estimados solo con Transyt. La variación en las demoras de toda la red se muestran a continuación:

**Tabla 24: Demoras totales obtenidas con Link Transyt-Aimsun**

Caso	Demoras [s/km]					
	Autos	Camiones	MiniBus	Bus EO	Bus OE	Todo
Actual	85,56	87,76	78,28	69,84	92,54	85,47
Veh	84,93	90,11	87,25	61,27	101,51	84,99
Per	87,2	90,01	89,96	59,67	76,81	86,87

**Tabla 25: Variación demoras totales**

Variación	$\Delta$ Demoras [%]					
	Autos	Camiones	MiniBus	Bus EO	Bus OE	Todo
Actual -Veh	0,74	-2,68	-11,46	12,27	-9,69	0,56
Actual -Per	-1,92	-2,56	-14,92	14,56	17,00	-1,64
Veh-Per	-2,67	0,11	-3,11	2,61	24,33	-2,21

Se observa que las demoras de los autos se ven favorecidas en el caso de la optimización Veh, pero empeora en el caso de Per. Para los camiones y mini buses, ambos casos empeoran, pero esto se debe a que su flujo es pequeño, por lo tanto no es relevante en la optimización. Lo interesante ocurre en el caso de los buses, para el sentido Este-Oeste al optimizar por Veh se ve favorecida, pero el beneficio aumenta aún más cuando se optimiza por Per. En el sentido Oeste-Este al optimizar por Veh, se ve un claro desbeneficio de aproximadamente un 10%, pero si se optimiza considerando las tasas de ocupación en beneficio llega a crecer hasta un 17%.

### 3.3 Resultados Escenarios en Transyt modelados en Aimsun

Para lograr una comparación más directa entre los resultados encontrados con Transyt y el Link, se procedió a microsimular los repartos de verde entregados por Transyt en Aimsun. A continuación se muestran los tiempos de viaje obtenidos:

**Tabla 26: Tiempos de viaje Oeste-Este**

Caso	TV Auto OE [s]	TV Bus OE [s]
Actual	65	107
Veh	57	88
Per	57	103

**Tabla 27: Tiempos de viaje Este-Oeste**

Caso	TV Auto EO [s]	TV Bus EO [s]
Actual	61	99
Veh	58	93
Per	56	92

**Tabla 28: Variación tiempo de viaje Oeste-Este**

Variación	$\Delta$ TV Auto OE [%]	$\Delta$ TV Bus OE [%]
Actual -Veh	12,31	17,76
Actual -Per	12,31	3,74
Veh-Per	0,00	-17,05

**Tabla 29: Variación tiempo de viaje Este-Oeste**

Variación	$\Delta$ TV Auto EO [%]	$\Delta$ TV Bus EO [%]
Actual -Veh	4,92	6,06
Actual -Per	8,20	7,07
Veh-Per	3,45	1,08

La particularidad principal de estos resultados ocurre en el desbeneficio provocado por la optimización de Per en sentido Oeste-Este, un aumento del 17% del tiempo de viaje, esto contradice los resultados entregados por Transyt. Si comparamos las programaciones obtenidas con el Link, prácticamente son iguales, su única diferencia recae en el desfase. Al ser tan distinto en el escenario de Transyt hace que los buses en el sentido Oeste-Este no coordinen su detención en el paradero con el verde del semáforo, lo que provoca una espera en el paradero más la provocada por el semáforo en rojo. La hipótesis es que Transyt al usar un modelo mesoscópico de tráfico, no modela apropiadamente la detención en paraderos, pues no considera la ubicación de paraderos (no asigna una detención física) y el tiempo de detención es repartido en todo el arco. Además no considera la variabilidad en los tiempos de detención, que es inherente a la

circulación de buses en esta red y es capturada por el modelo microscópico. Luego, la modelación inferior del comportamiento de buses está afectando el desfase óptimo entre intersecciones contiguas que tienen paraderos entre ellas.

#### 4. IMPACTO EN OFERTA ÓPTIMA DE BUSES

Al comparar los resultados de programación óptima basada en flujo de personas y flujo de vehículos, dependiendo del escenario analizado y herramienta de modelación utilizada, se obtienen ahorros en el tiempo de viaje de buses entre 0 y 20%. La robustez de estos resultados será analizada posteriormente en otros escenarios, en particular, en redes más complejas. Sin embargo, estos resultados muestran el potencial de la optimización de la programación de semáforos que considera la tasa de ocupación de pasajeros en los vehículos de transporte público. En esta sección, se analiza el impacto potencial de una reducción en tiempo de viaje de los buses, en la frecuencia óptima de operación de una línea. Se utiliza el modelo básico de Mohring (1972), en el cual la función de costo total incluye el costo del operador y el costo asociado al tiempo de acceso, de espera y en vehículo:

$$G_T = f t_c c + P_e \left( \frac{1}{2f} \right) Y + P_v t_v Y + P_a t_a Y \quad (8)$$

Este modelo supone que los buses llegan a intervalos regulares, donde  $f$  es la frecuencia de operación (bus/h),  $t_c$  es el tiempo de ciclo (en el recorrido completo) de los buses (h),  $c$  es el costo fijo por vehículo (\$/bus),  $P_e$  es el valor del tiempo de espera (\$/h),  $Y$  es la demanda uniformemente distribuida (pax),  $t_v$  es el tiempo en vehículo (h),  $P_v$  es el valor del tiempo en vehículo (\$/h),  $t_a$  es el tiempo de acceso (h) y  $P_a$  es el valor del tiempo de acceso (\$/h).

Al minimizar expresión (8) con respecto a la frecuencia, se obtiene la frecuencia óptima de operación:

$$f^* = \sqrt{\frac{1}{t_c} \frac{P_e Y}{2c}} \quad (9)$$

Si nos fijamos en la frecuencia óptima, ante una disminución del tiempo de ciclo  $t_c$ , ocurrirá un aumento de la frecuencia proporcional a la raíz cuadrada de éste. Además, el tamaño de flota  $B$  está dado por:

$$B = f \cdot t_c \quad (10)$$

Es decir, si la reducción de tiempo de viaje de buses se transfiere en un ajuste en la oferta óptima, se obtiene que el aumento de la frecuencia (menos que lineal) y la disminución del tiempo de ciclo, provocarán una disminución de vehículos necesarios para cubrir este nivel de servicio. Entonces, al tener una menor flota los costos de los operadores se ve reducido, tanto por la disminución de flota como por ahorro en costos de operación (e.g., el consumo de combustible disminuye si los buses circulan más rápido en el contexto urbano). Por otro lado, el costo de los usuarios disminuye, ya que su tiempo de espera dada una mayor frecuencia y el tiempo en el vehículo disminuyen, provocando una mejora del bienestar de los usuarios.

Finalmente, en el supuesto de que no existiera un aumento de la frecuencia de servicio de los buses dado la disminución de tiempo de viaje, los operadores disminuirían su costo de todas formas dado que el tiempo de ciclo es menor, y los usuarios verían reducido su tiempo en el vehículo. Es decir, en este caso también hay beneficios para operadores y usuarios. Este simple ejercicio muestra la relación entre la programación óptima de semáforos, los costos del operador y los costos asociados al usuario. Luego, el modelo de Mohring (1972) muestra que el supuesto utilizado para la programación óptima de semáforos puede tener consecuencias incluso en el diseño óptimo del servicio. Es por esto que se genera la necesidad de plantear un modelo que relacione la frecuencia óptima con la programación óptima de semáforos, demostrándose que podrían estar relacionados numéricamente.

## 5. CONCLUSIONES

La optimización de semáforos resulta ser una herramienta importante para disminuir los tiempos de viaje en redes multimodales. Actualmente se realiza optimización basada en vehículos, lo cual no genera una solución óptima cuando la función objetivo utilizada considera el flujo de personas en lugar del flujo de vehículos. En este trabajo se muestra, utilizando una red muy simple, los potenciales impactos en la programación óptima de semáforos de considerar la tasa de ocupación de buses y automóviles para ponderar las demoras de cada tipo de vehículo.

Nuestra red simple muestra que la programación de semáforos basada en personas puede mejorar de forma no despreciable la circulación de buses, al costo de incrementar ligeramente la demora total de vehículos particulares. Además, con un análisis de frecuencia óptima basado en el modelo de Mohring (1972), se analizó el efecto que cambiar el supuesto para la programación óptima de semáforos puede tener en el diseño óptimo de servicio y en el tiempo de espera y de viaje de los usuarios.

En cuanto a los software usados, un primer resultado es que Transyt, al no modelar en detalle la circulación de buses y sus características en la red, incluyendo la detención en paraderos, provoca un error en la programación óptima de semáforos cuando se analizan en un software de microsimulación, principalmente afectado el desfase óptimo. Más investigación es necesaria para determinar la generalidad de este resultado y sus razones. Con esto, se espera dar recomendaciones no solo sobre programación de semáforos que beneficie al transporte público, sino que sobre la utilización de estos software como herramientas para resolver estos problemas.

Finalmente, el hecho de encontrar una relación directa entre la optimización de semáforos, a través de la disminución del ciclo, con la frecuencia óptima de buses, genera las directrices para seguir trabajando en un modelo que minimice los costos totales del sistema a partir de frecuencias y programaciones óptimas.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha recibido financiamiento parcial del Proyecto Fondecyt “Social effects and quality of service valuation of public transport services” (11130227) y del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ICM P-05-004-F, CONICYT FBO16).

## REFERENCIAS

- Daganzo, C.F. (1994) The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with hydrodynamic theory. **Transportation Research B**, 28(4), 269-287.
- Daganzo, C.F. (1995) The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with hydrodynamic theory part II. **Transportation Research B**, 29(2), 79-93.
- Furth, P.G., B. Cesme, T. Rima (2010) Signal priority near major bus terminal. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2192, 89-96.
- Gardner, K., C. D'souza, N. Hounsell, B. Shrestha, D. Bretherton (2009) Review of bus priority at traffic signals around the world. **UITP Working Group Technical Report**.
- Gibson, J. y J.F. Aguirre (1984) Replanteamiento del modelo de dispersión de tráfico de Robertson. **Actas del I Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Santiago, Chile.**, 291-305.
- Gibson, J., M. Munizaga, C. Schneider y A. Tirachini (2014) Median busways versus mixed-traffic: Estimation of bus travel time under different priority conditions with explicit modelling of delay at traffic signals. **Paper presented at the Transportation Research Board 94th Annual Meeting**.
- Gipps, P. G. (1981) A behavioural car following model for computer simulation. **Transportation Research B**, 15, 105-111.
- Gipps, P. G. (1986) A model for the structure of lane-changing decisions. **Transportation Research Board**, 20B, 403-414.
- Jara-Díaz, S.R. y A. Gschwender (2003) Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. **Transport Reviews**, 23(4), 453 - 469.
- Ma, W., Head, K.L., Feng, Y., 2014. Integrated optimization of transit priority operation at isolated intersections: A person-capacity-based approach. **Transportation Research Part C-Emerging Technologies**, 40, 49-62.
- Maher, M. (2011) A comparison of the use of the cell transmission and platoon dispersion models in TRANSYT 13. **Transportation Planning and Technology**, 34(1), 71-85.
- Mohring, H. (1972) Optimization and scale economies in urban bus transportation. **American Economic Review**, 62(4), 591-604.
- Tirachini, A. (2014) The economics and engineering of bus stops: Spacing, design and congestion. **Transportation Research Part A**, 59, 37-57.