

MODELO DE PROGRAMACIÓN ENTERA PARA APOYAR LA OPERACIÓN DE UNA UNIDAD DE NEGOCIO DEL TRANSANTIAGO

Diego M. Muñoz C., Universidad de Chile, diemunoz@ing.uchile.cl

Cristián E. Cortés, Universidad de Chile, ccortes@ing.uchile.cl

Pablo A. Rey, Universidad Diego Portales, pablo.rey@udp.cl

Jaime Miranda P., Universidad de Chile, jmirandap@fen.uchile.cl

RESUMEN

El presente trabajo describe un enfoque de programación entera mixta para apoyar el funcionamiento de una empresa a cargo de los servicios F del Transantiago. El modelo propuesto resuelve las etapas de diseño de horarios, asignación y programación de buses de forma integrada. Adicionalmente, se incorpora la estrategia de *deadheading*, para hacer más eficiente el uso de buses y ajustar la oferta en periodos críticos, donde existe mayor demanda en una ruta del servicio. Se estudió el impacto de disminuir el tiempo de viaje por estas rutas de *deadheading* sobre la flota requerida, reduciendo la flota entre 1.4% y 9%.

Palabras clave: Transporte Público, Programación Entera, Deadheading

ABSTRACT

The present work describes an approach based on mixed integer programming to help support the operation of a company in charge of F feeder services of the Transantiago. The proposed model solves the stages of timetables, assignments and scheduling of buses in an integrated way. Additionally, the model incorporates deadheading strategy to make more efficient use of the buses and adjust supply to demand at critical periods, where there is greater demand on a service route. We studied the impact of decreasing the travel time by these *deadheading* routes on the fleet required, reducing the fleet between 1.4% and 9%.

Key words: Public Transport, Integer Programming, Deadheading

1. INTRODUCCIÓN

Transantiago es un programa impulsado por el Gobierno de Chile destinado a implementar un sistema de transporte público completamente nuevo para la ciudad de Santiago de Chile. Este sistema, que comenzó a operar el 10 de Febrero del 2007, cambió el diseño anterior del sistema de transporte público con el propósito de hacerlo más eficiente, organizado, y con la capacidad de ofrecer un mejor nivel de servicio para los usuarios del transporte público de Santiago. Este programa contempla la integración tarifaria entre el sistema de buses y trenes interurbanos, lo que no ocurría antes. En términos operacionales, el nuevo sistema reemplaza la estructura de las antiguas líneas de buses por un sistema troncal-alimentador, conceptualmente basado en un diseño de red basado en nodos de transferencia propuesto por (Schneider y Smith 1981). Santiago fue dividida en 10 áreas de servicio, las cuales incluyen un pequeño grupo de unidades administrativas denominadas comunas. Las rutas locales (o alimentadoras) son definidas dentro de cada área de servicio, ya sea para viajes locales o viajes que requieren al menos un transbordo a otra ruta. Por lo tanto, el diseño de estas rutas alimentadoras debe considerar que los pasajeros pueden transbordar entre las rutas troncales, las cuales conectan zonas distantes de la ciudad a través de corredores rápidos. En el actual diseño del Transantiago existen 5 servicios troncales y 9 servicios alimentadores los cuales fueron adjudicados a 7 compañías privadas.¹

De acuerdo a (Ceder 2002, 2007), el proceso de planificación de las operaciones del transporte público comprende cuatro etapas fundamentales: (1) diseño de la red de transporte, (2) diseño de los horarios de los viajes, (3) programación de buses y (4) asignación de conductores. El diseño de recorridos de la red ya está establecido, a pesar de esto el operador puede proponer nuevos recorridos o modificar los actuales. No obstante la etapa (1) y (4) quedan fuera de este trabajo.

En la literatura especializada se encuentran diferentes enfoques para tratar con las diferentes etapas del proceso de planificación del transporte público. Para el diseño del horario de viajes, se encuentran tanto métodos heurísticos como de optimización exacta dependiendo de las características específicas del problema. (Wirasinghe, 2003) introducen el concepto de optimizar el horario de *tiempos muertos* en puntos intermedios de la ruta junto con la minimización de los tiempos de espera, así como los costos de operación. El caso más difícil que contempla el diseño de horarios de viaje en el sistema de buses son aquellos en los cuales los horarios se intentan coordinar en ciertas paradas de transbordo, por lo que las transferencias dentro de la red deben estar bien sincronizadas. Inicialmente, métodos para sincronización en un solo punto fueron propuestos, donde los tiempos muertos son optimizados a fin de minimizar la espera de los pasajeros (Klemt y Stemme, 1988). También se presentan modelos analíticos que optimizan los tiempos muertos y los *headways*² de las rutas de conexión en las estaciones de transferencia (Chien y Schonfeld, 1998), extendiendo en algunos casos para cubrir múltiples puntos de transferencia. Dada la complejidad de los problemas enteros mixtos resultantes, métodos heurísticos han sido desarrollados para encontrar tiempos muertos y *headways* comunes entre rutas (Chowdhury

¹ Más detalles del Transantiago en (Transantiago, 2012).

² *Headway* (en inglés) es el tiempo transcurrido entre viajes consecutivos en la misma ruta (APTA, 1994).

y Chien, 2001; Ting y Schonfeld, 2005). (Ceder y Tal 1999, 2001) introducen un modelo para maximizar el número de conexiones sincronizadas entre rutas.

Con respecto a la segunda etapa (asignación de vehículos), el objetivo es encontrar la asignación óptima de los buses para satisfacer la demanda en un conjunto de horarios de viajes dado. Una cadena de viajes es asignada a cada vehículo considerando que algunos de ellos pueden hacer viajes en *deadheading* para alcanzar optimalidad. El *deadheading* es una estrategia de asignación de flota, la cual consiste en permitir a los buses realizar rutas a puertas cerradas y sin pasajeros, para así disminuir los tiempos de viaje y lograr una mayor disponibilidad de los buses para servir la ruta con mayor demanda. El problema básico es conocido en la literatura como el *multiple depot vehicle scheduling problem* (en adelante MDVSP), el cual ha sido estudiado no solo en el contexto de buses (Daduna y Paixao, 1995), sino que también en el estudio de otros modos, por ejemplo trenes (Cordeau et al., 2001) y aerolíneas (Hane et al., 1995). (Lobel 1998,1999) y (Mesquita y Paixao 1999) han propuesto formulaciones para el MDVSP así como métodos capaces de resolver tales formulaciones de manera exacta; los primeros a través de un algoritmo branch-and-cut mientras que los segundos por un proceso de búsqueda en árbol. (Kwan y Rahin 1999) desarrollaron un enfoque orientado al objeto para programación de buses, mientras (Dell Amico et al., 1993) desarrollan heurísticas basadas en construcciones de rutas mínimas con el objeto de minimizar el tamaño de flota. (Banihashemi y Haghani 2000), (Haghani y Banihashemi 2002) se enfocan en resolver una aplicación real del MDVSP, de donde desarrollan heurísticas y métodos exactos que aplican sobre ciudades reales. (Freling et al., 2001a) usa algoritmos del tipo auction para resolver el problema con un terminal y vehículos idénticos. (Pepin et al., 2006) prueban que la solución óptima para *single depot vehicle scheduling problem* (SDVSP) puede encontrarse en tiempo polinomial. (Ceder 2005, 2007) muestran una técnica interactiva para asistir al operador proponiendo programaciones variables. Respecto de (Forbes et al., 1994), aplican una red de tiempo expandida a un problema similar al descrito por nosotros. En su trabajo, los nodos de transbordo no son incluidos; como consecuencia, un bus que sale desde terminal no puede regresar a este y permanecer esperando para realizar otro viaje. Posteriormente, (Haghani y Banihashemi 2002) modificaron la estructura de la red añadiendo nodos de transbordo, los cuales permiten a los buses retornar a terminal para realizar otro viaje.

El modelo propuesto fue diseñado en orden de cumplir las condiciones operacionales impuestas por la autoridad, las cuales corresponden a frecuencias, capacidad de transporte y *headways* por periodo (punta y no punta), entre otros requisitos técnicos. En cuanto a la frecuencia se desea que los usuarios no esperen más allá de 12 minutos en la mayor parte del día. En cuanto a la capacidad de transporte a ofertar, se desea que en los tramos más cargados de cada servicio-ruta no se sobrepase el 90% en su relación Demanda/Oferta.

En este trabajo se desarrolla un modelo integrado de las etapas de diseño de horarios y asignación de vehículos a viajes, que se basa en cierto sentido en el esquema de red propuesto por Haghani y Banihashemi (2002); en la siguiente sección se describen con mayor cuidado las etapas de planificación introducidas, para luego mostrar el modelo desarrollado. Se muestran resultados del modelo sobre una aplicación real.

2. ETAPAS DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Actualmente el diseño de la red de transporte del Transantiago ya está establecido, las etapas restantes para completar el proceso operacional del transporte público conducen a un proceso secuencial de tres etapas, las que se definen a continuación.

2.1. Diseño del horario de viajes o Timetabling

En esta etapa se debe decidir la hora de inicio en la cual un bus saldrá a realizar un determinado viaje³ por un servicio-ruta. Un servicio es un recorrido el que contempla dos cabezales⁴ unidos a través de dos rutas, las cuales definen el sentido del viaje.

2.2. Asignación de buses a viajes.

En esta etapa se debe realizar la asignación de buses a los viajes establecidos en la etapa anterior, de manera de cumplirlos todos y realizando la asignación de forma de minimizar los costos fijos y/o operacionales. Esta etapa determina la flota mínima necesaria para cumplir con todos los viajes definidos en el Timetabling.

2.3. Asignación de conductores.

En esta etapa se deben asignar tareas específicas a los conductores, definiendo los días del mes en que trabajará y en que bloques horarios dentro del día lo hará, cumpliendo las restricciones contractuales, como por ejemplo el límite de horas de trabajo al día y a la semana. Esta etapa determina el número mínimo de conductores necesarios.

3. MODELADO DEL PROBLEMA

En general, en la literatura se aborda el diseño de horarios de viajes de forma separada a la asignación de vehículos. En nuestra aplicación, las restricciones asociadas a la capacidad de transporte y a las frecuencias impuestas en los contratos, permiten elegir diferentes combinaciones de buses de diferentes tamaños para cumplir los requisitos de transporte. Bajo este esquema, el diseño de horarios de viaje independiente de la asignación de buses produciría decisiones sub-óptimas. La presente sección detalla el modelo desarrollado en este trabajo, con el fin de formular y resolver las etapas de planificación 2.1 y 2.2 que fueron descritas en la Sección 2 (diseño de horarios de viaje y asignación de buses a viajes). Como se mencionó antes, estas etapas son resueltas de forma conjunta y la programación de los buses es obtenida.

3.1. Diseño del horario de viajes y asignación de vehículos.

La metodología propuesta tiene por objetivo decidir el terminal inicial, la hora de salida, y el tipo de vehículo que debe realizar el viaje al mínimo costo operacional. Para formular el problema, se construyen redes espacio-tiempo (una para cada tipo de bus), basados en el

³ Un viaje contempla un tiempo de inicio y fin, los que corresponden a la salida y llegada a terminal respectivamente.

⁴ Un cabezal corresponde al inicio de la ruta.

esquema propuesto por (Forbes et al., 1994) y posteriormente modificado por (Haghani y Banihashemi 2002). En este trabajo, añadimos atributos específicos que representan los costos de operación en el esquema de optimización. Además, un nivel satisfactorio de servicio se cumple por medio de las restricciones de frecuencia y capacidad de transporte añadidas al modelo.

3.1.1. Red expandida en el tiempo para la planificación de viajes

El problema es modelado a través de una de una red expandida en el tiempo. El tiempo continuo a lo largo de la jornada de trabajo es discretizado en periodos de duración fija indexado por t , con $t \in \{1, \dots, T\}$. Cada combinación de terminal ($d \in \{1, \dots, D\}$) y tipo de bus ($b \in \{1, \dots, B\}$) es representada por una red diferente. Para cada red en un periodo t , se construye una capa que contiene cuatro tipos de nodos que representan:

- Un viaje comenzando dentro de un periodo t (nodo de viaje);
- Un bus comenzando el día de trabajo en un periodo t (nodo comienzo de día o Fuente);
- Un bus esperando en el terminal para iniciar un viaje asignado (nodo de transbordo);
- Un bus sin tareas restantes en t y ya guardado en el terminal hasta el día siguiente (nodo fin de día o Sumidero)

Con respecto a los arcos de la red, se tienen los siguientes casos:

- Arcos conectando nodos de comienzo de día a viajes y viajes a fin de día;
- Arcos conectando viajes a viajes;
- Arcos conectando viajes a transbordos;
- Arcos conectando transbordos a transbordos;

La Figura 2 ilustra los nodos y arcos antes descritos.

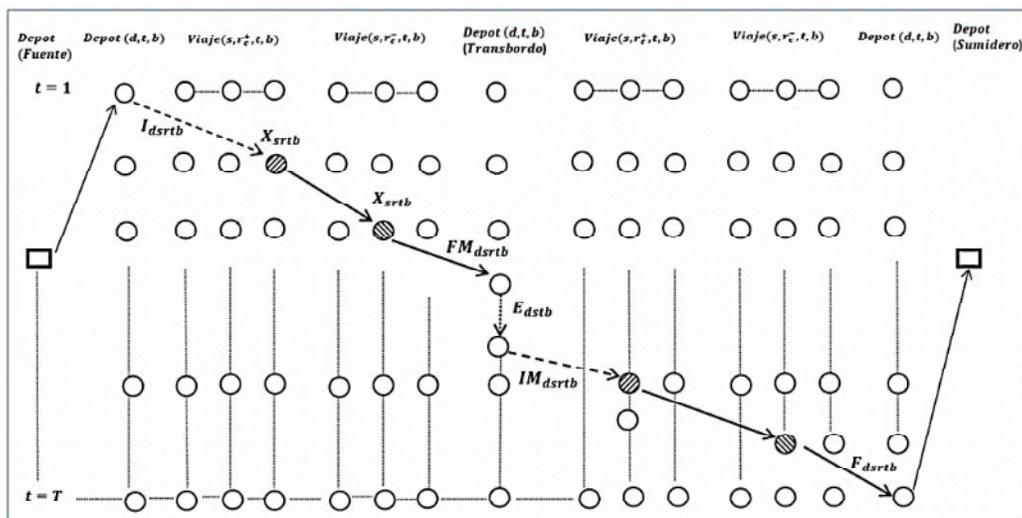


Figura 1: Red expandida en el tiempo para un terminal d y un tipo de bus b .

En nuestra red expandida en el tiempo, un camino de una fuente a un sumidero representa una secuencia de viajes y periodos de espera para un tipo de bus particular en el día de operación. El modelo incluye una serie de condiciones necesarias para definir las rutas adecuadas en términos de conservación de flujo. Además, la formulación debe considerar restricciones globales asociadas a las condiciones impuestas por la autoridad, por la empresa y algunos temas operacionales.

Transantiago impone que tanto la frecuencia como la capacidad de transporte deben cumplir con umbrales mínimos establecidos según los contratos de concesión. La formulación general del modelo es capaz de manejar varias flexibilidades operacionales, puntualmente, las rutas no tienen necesariamente que partir de un terminal y además, un bus específico podría ser asignado a diferentes rutas durante la jornada laboral. Sin embargo, en la operación actual la empresa simplifica el problema imponiendo que cada ruta sea iniciada desde un terminal predefinido y cada bus puede servir sólo un servicio durante el día comenzando en el terminal en el cual el bus es asignado.

3.2. Formulación Matemática

En esta sección se describe nuestra formulación matemática, que se basa en la estructura de red descrita en 3.1.1. Antes de describir el modelo introduciremos la siguiente notación. Sea D el conjunto de terminales, S el conjunto de servicios, R el conjunto de rutas, B el conjunto de tipos de buses y T el conjunto de periodos de tiempo. Además se define el conjunto $\Omega^t(s, r, b)$, el cual contempla los viajes que no puede realizar un bus tipo $b \in B$ por la ruta $r \in R$ en el servicio $s \in S$ en el periodo $t \in T$. Como se mencionó en la sección 2, un servicio $s \in S$ contempla dos cabezales y distintas rutas como se observa en la Figura 2. El conjunto de rutas R se divide en 4 y se diferencian las rutas comerciales de las rutas de *deadheading* a través de los siguientes conjuntos:

- 1) R^+ : ruta *Terminal - Cabezal1 - Cabezal2*.
- 2) R^- : ruta *Cabezal2 - Cabezal1 - Terminal*.
- 3) R_d^+ : ruta de *deadheading Terminal - Cabezal2*.
- 4) R_d^- : ruta de *deadheading Cabezal2 - Terminal*.
- 5) $R_c^+ = R^+ \cup R_d^+$, $R_c^- = R^- \cup R_d^-$ y $R_v = R^- \cup R^+$.

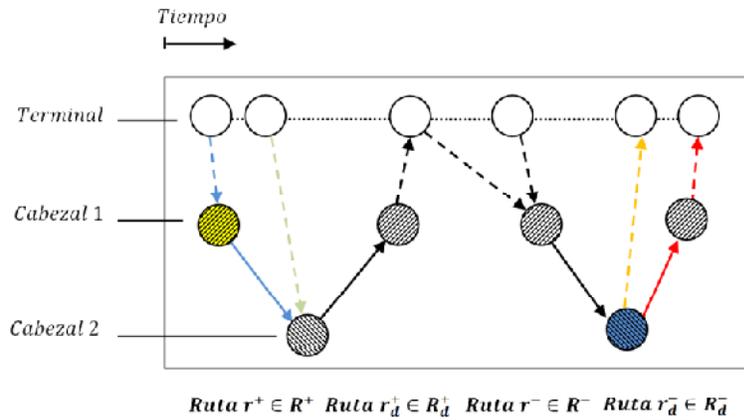


Figura 2: Conjunto de rutas.

Los parámetros y variables de decisión utilizadas en nuestro modelo son presentadas en las Tablas 1 y 2:

Tabla 1: Variables del modelo de diseño de programación y asignación de vehículos.

Variable	Tipo	Definición
I_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b sale desde el terminal d en el periodo t a realizar su primer viaje del día el que corresponde al servicio s por la ruta r ; igual 0, en otro caso.
IM_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b sale desde el terminal d en el periodo t a realizar un viaje (pero no es el primero) del servicio s por la ruta r ; igual 0, en otro caso.
F_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b se dirige a terminal d luego de finalizar su último viaje del día, el que corresponde al servicio s por la ruta r que comenzó en el periodo t ; igual a 0, en otro caso.
FM_{dsrb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b se dirige a terminal d luego de finalizar un viaje, del servicio s por la ruta r que comenzó en el periodo t ; igual a 0, en otro caso.
X_{srb}^t	Binario	Igual a 1 si un bus del tipo b comienza un viaje en el servicio s por la ruta r en el instante t ; igual a 0, en otro caso.
E_{dsb}^t	Entero	Número de buses del tipo b asignados al servicio s , que están esperando en el terminal d entre el periodo t a $t + 1$.

Tabla 2: Parámetros del modelo de programación y asignación de vehículos.

Parámetro	Definición
ds_{sr}	Distancia total de un servicio s por la ruta r (en km).
dr_{dsr}	Distancia entre un terminal d y el comienzo de una ruta r del servicio s (en km).
ts_{srt}	Tiempo de viaje del servicio s por la ruta r si comenzó en t (en periodos de tiempo).
tr_{dsrt}	Tiempo de viaje desde el terminal d al comienzo de la ruta r del servicio s , si salió en t .
cf_b	Costo fijo de utilizar un bus del tipo b (en \$).
cv_b	Costo variable por operar un bus del tipo b (en \$/km).
$CapMin_{isr}$	Capacidad mínima por hora a ofertar del servicio s por la ruta r durante el intervalo i .
$CapMax_{isr}$	Capacidad máxima por hora a ofertar del servicio s por la ruta r durante el intervalo de tiempo i .
$MinH_{srt}$	Headway mínimo asociado al servicio s por la ruta r entre viajes sucesivos, con el primer viaje iniciado en el periodo t (en periodos de tiempo).
$MaxH_{srt}$	Headway máximo asociado al servicio s por la ruta r entre viajes sucesivos, con el primer viaje iniciado en el periodo t (en periodos de tiempo).
$Buses_{db}$	Número de buses del tipo b en el terminal d .
$CapBus_b$	Capacidad de transporte de pasajeros del bus tipo b (en número de pasajeros).
$\tau_1(s, r, t)$	Tiempo en el cual un bus debe iniciar un viaje por el servicio s y ruta $r \in R_c^-$ para finalizar en el periodo t .
$\tau_2(s, r, t)$	Tiempo en el cual un bus debe salir desde terminal para iniciar un viaje en el servicio s por la ruta $r \in R_c^+$ en el periodo t .
$\tau_3(s, r, t)$	Tiempo en el cual un bus debe iniciar un viaje por el servicio s y ruta $r \in R^+$ para finalizar en el periodo t .

Los costos fijos cf_b incluyen los costos de adquisición, alquiler de los buses y de los salarios de los conductores, mientras que los costos variables cv_b consideran elementos como repuestos, neumáticos, petróleo y lubricantes.

El modelo propuesto para el diseño de horarios, asignación y programación de buses se presenta a continuación:

$$\min \sum_{(d,s,r,t,b) \in DSRTB} [cf_b \cdot I_{dsrb}^t + cv_b \cdot (ds_{sr} + dr_{dsr}) \cdot (I_{dsrb}^t + IM_{dsrb}^t + F_{dsrb}^t + FM_{dsrb}^t)], \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{(t,r) \in TR_c^+} I_{dsrb}^t - \sum_{(t,r) \in TR_c^-} F_{dsrb}^t = 0, \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B, \quad (2)$$

$$\sum_{r \in R_c^-} FM_{dsrb}^{\tau_1(s,r,t)} + E_{dsb}^{t-1} = \sum_{r \in R_c^+} IM_{dsrb}^t + E_{dsb}^t, \quad \forall (d, s, b, t) \in D \times S \times B \times T \quad t > 1, \quad (3)$$

donde $\tau_1(s, r, t)$ satisface $t = \tau_1(s, r, t) + ts_{sr\tau_1(s,r,t)} + tr_{dsr\tau_1(s,r,t)}$,

$$E_{dsb}^0 = E_{dsb}^T = 0 \quad \forall (d, s, b) \in D \times S \times B, \quad (4)$$

$$\sum_{d \in D} I_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} + \sum_{d \in D} IM_{dsrb}^{\tau_2(s,r,t)} = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, t, b) \in S \times R_c^+ \times T \times B, \quad (5)$$

donde $\tau_2(s, r, t)$ satisface $t = \tau_2(s, r, t) + tr_{dsr\tau_2(s,r,t)}$,

$$X_{sr_1b}^{\tau_3(s,r_1,t)} = \sum_{r_2 \in R_c^-} X_{sr_2b}^t \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, r_1 \in R^+ \quad (6)$$

$$X_{sr_3b}^{\tau_3(s,r_1,t)} = X_{sr_4b}^t \quad \forall (s, b, t) \in S \times B \times T, r_3 \in R_d^-, r_4 \in R^- \quad (7)$$

donde $\tau_3(s, r, t)$ satisface $t = \tau_3(s, r, t) + ts_{sr\tau_3(s,r,t)}$,

$$\sum_{d \in D} F_{dsrb}^t + \sum_{d \in D} FM_{dsrb}^t = X_{srb}^t, \quad \forall (s, r, b, t) \in S \times R_c^- \times B \times T, \quad (8)$$

$$\sum_{(s,r,t) \in SR_c^+ T} I_{dsrb}^t \leq Buses_{db}, \quad \forall (d, b) \in D \times B, \quad (9)$$

$$CapMin_{isr} \leq \sum_b \left(\sum_{t \in H} BusCap_b X_{srb}^t \right) \leq CapMax_{isr}, \quad \forall (s, r, b, t) \in I \times S \times R_v, h \in H(i) \quad (10)$$

donde $H(i)$ es el conjunto de horas de operación del intervalo i ,

$$\sum_b \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \geq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R_v \times T \text{ tal que } t < T, \quad (11)$$

$$\sum_b \left(\sum_{t'=t}^{t+MaxH_{srt}-1} X_{srb}^{t'} \right) \leq 1, \quad \forall (s, r, t) \in S \times R_v \times T \text{ tal que } t < T, \quad (12)$$

$$X_{srb}^t = 0, \quad \forall (s, r, t) \in \Omega_{(s,r,t)}^t, \quad (13)$$

$$I_{dsrb}^t, F_{dsrb}^t, IM_{dsrb}^t, FM_{dsrb}^t, X_{srb}^t \in \{0,1\} \text{ y } E_{dsb}^t \in \mathbb{Z}^+ \quad (14)$$

La función objetivo (1) comprende la minimización de los costos fijos y operacionales, asociados con la programación elegida. El costo fijo se calcula a través de las variables I , teniendo en cuenta el primer viaje de cada bus utilizado. El otro término cuantifica el costo variable de operación de flota, incluyendo el costo de realizar el viaje más la porción de *deadheading* (desde y hacia terminal). La restricción (2) obliga que el número total de buses que salen desde el terminal d debe ser igual al número de buses que finalizan su operación en el mismo terminal. Esta restricción es impuesta con el objetivo de obtener una programación cíclica que mantenga el mismo número de buses en cada terminal. Las restricciones (3-8) corresponden a la conservación de flujo dentro de la red expandida en el tiempo descrita anteriormente. La restricción (3) conserva los flujos en los nodos de transbordo en los cuales los buses esperan una asignación de viaje. Tener en cuenta que para un terminal de transbordo específico d y un periodo de tiempo t , el lado izquierdo de la restricción cuantifica los buses que esperan a partir del periodo anterior más los buses procedentes de un viaje que culmino en el tiempo t . El lado derecho de (3) incluye los buses que permanecen en el terminal durante otro periodo (hasta $t + 1$ por lo menos), más los buses que salen del terminal para iniciar otro viaje en t ; la Figura 3 muestra la conservación en un terminal como parte de la red.

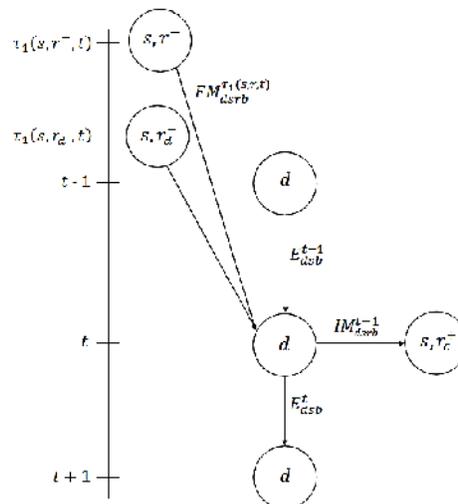


Figura 3: Red expandida en el tiempo: conservación en nodo terminal.

La restricción (4) asegura que no existen buses esperando en un terminal de transbordo al comienzo y al final del día. Restricciones (5), (6), (7) y (8) relacionan la variable de decisión de viaje X con las variables de asignación de buses I , IM , F y FM ; la Figura 4 muestra la conservación en los nodos de viaje de la red representada por estas restricciones.

La restricción (9) limita las salidas iniciales por tipo de bus desde un terminal a la cantidad de buses disponibles por tipo. La restricción (10) asegura que la capacidad de transporte ofrecida por hora para cada servicio-ruta, sea a lo menos la capacidad mínima estimada. Notar que la sumatoria en el paréntesis cuenta la capacidad del bus sobre cierto intervalo de horas de funcionamiento h que pertenecen a un intervalo de operación i definido por Transantiago, donde $H(i)$ contiene todas las horas h que pertenecen al intervalo de operación i .

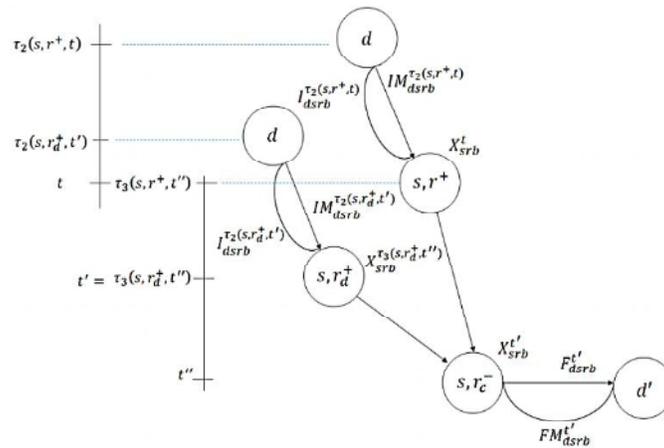


Figura 4: Red expandida en el tiempo: conservación en nodos de viaje.

Las horas consideradas en la definición de $H(i)$ son las horas que comienzan cada Δ periodos de tiempo, con la primera hora comenzando al inicio de la operación del intervalo. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de tal definición, considerando $\Delta = 15$ periodos de tiempo (30 minutos en total), para este caso $H(i) = \{h, h2, h3, h4\}$.

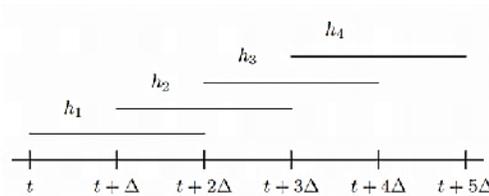


Figura 5: Horas continuas para un intervalo de operación.

Por otra parte, el conjunto de restricciones (11) y (12) impone condiciones sobre los *headways* entre el comienzo de los viajes para un servicio específico. Las restricciones se escriben en términos de *headways* porque además de operar dentro del rango de frecuencias exigidas, se añade la condición de regularidad para el sistema con el fin de minimizar los tiempos de espera y garantizar un adecuado nivel de servicio para los usuarios. Finalmente, la restricción (13) restringe las salidas de un tipo particular de bus tipo b por un servicio s , ya sea por condiciones viales (virajes muy estrechos) o exigencias de la empresa (servicios con alta demanda solo con buses de alta capacidad).

4. APLICACIÓN REAL

La Unidad de Negocio 7 (UN7) está a cargo de la operación de los servicios F de la zona de Puente Alto, la cual posee una superficie de 88 km² y 586.509 habitantes, siendo la comuna más poblada de Chile. Actualmente posee 4 terminales, 30 servicios, 60 rutas comerciales, 331 buses de flota base y una participación de 5,9% sobre un total de 90 millones de transacciones mensuales que genera el sistema de buses (Alimentadores y Troncales). Respecto a la demanda, se observa que la intensidad cambia a lo largo del día. En horarios punta existen grandes desbalances, esto debido a que en la mañana los usuarios de esta

unidad se dirigen de la periferia al centro y en la tarde del centro a la periferia. Para tratar con esto, el modelo propuesto incorpora la estrategia de *deadheading*, permitiendo al bus realizar rutas a puertas cerradas y sin pasajeros, disminuyendo los tiempos de viaje y aumentar la disponibilidad de buses para servir la ruta con mayor demanda. Nuestro estudio se focaliza en la resolución del Terminal Juanita, el cual contiene 9 servicios, 18 rutas comerciales, 18 rutas de *deadheading* y 118 buses (108 son de plaza⁵ 97 y 10 de plaza 60). La solución actual de la empresa contempla un número de viajes igual a 2.076 para este terminal, de los cuales 282 corresponden al periodo punta mañana (6:30-8:30) y 407 al periodo punta tarde (17:30-20:30), los cuales representan la mayor exigencia del día.

5. EXPERIMENTOS

Tanto los tiempos de viaje como las demandas por servicio-ruta fueron estimados a través del desarrollo de metodologías, las cuales se detallan brevemente a continuación.

5.1. Estimación de tiempos de viaje

En cuanto a los tiempos de viaje, se utiliza la información obtenida a través de los sistemas GPS de los buses y la metodología válida para Transantiago descrita en (Coordinación Transantiago, 2010). A diferencia de la metodología anterior en esta investigación se incorporan *tiempos muertos*. Estos tiempos se originan ya sea por una mala lectura del inicio y/o fin de un viaje (debido a que el bus permanece en la geo-cerca (descrito en (Coordinación Transantiago, 2010)) durante un periodo extenso), típicamente ocurre esto en un paradero de alta demanda o por pérdidas de transmisión (subterráneos). Para el tiempo de viaje por las rutas de *deadheading* (DH), la empresa a la fecha no posee un registro exhaustivo, dada esta limitación se trabaja bajo el supuesto que la ruta de *deadheading* tiene una duración de un 30% menos a la ruta comercial.

5.2. Estimación de la demanda

Para estimar la demanda se hace uso de la información entregada por Transantiago, la cual contiene todas las transacciones realizadas y la Fecha-Hora-Patente registrada. Con la información anterior se realiza un cruce con el registro de asignación de los buses (Fecha-Hora-Patente-Servicio-Ruta) y se agrupa el resultado cada media hora y por servicio-ruta. A la muestra obtenida se le aplica una regresión Kernel (Hastie et al, 2001), la cual es una técnica no paramétrica para estimar la esperanza condicional de una variable aleatoria, donde la estimación se logra a través de una función de ponderación o Kernel. Al resultado anterior se le incorpora la evasión registrada en el estudio realizado por el DICTUC en el año 2012.

A continuación se presentan los resultados de los experimentos realizados, los cuales fueron ejecutados en un computador personal Dell, CPU Intel® Core™ i7 2640-M 2.8 GHz con 16 GB RAM, usando ILOG CPLEX 12.2 como paquete de optimización.

⁵ La plaza corresponde a la cantidad de pasajeros que puede transportar un bus.

5.3. Resultados

La cantidad de buses necesarios para operar en la instancia “DH 30% menos” es de 136 buses y el diseño de flota requerido se presenta en la Tabla siguiente:

Tabla 3: Diseño de flota instancia DH 30% menos.

Servicio	F10	F12	F12C	F13	F13C	F15	F18	F25	F25E	Total
Buses Plaza 60	0	0	5	0	5	0	0	0	0	10
Buses Plaza 97	24	12	0	29	5	13	16	16	11	126

En cuanto al número de salidas, la comparación de la solución del modelo con la situación actual de la empresa se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 4: Comparación de salidas solución actual y solución modelo.

Periodo	Punta Mañana	Punta Tarde	Día Completo
Solución Actual	282	407	2.076
Solución Modelo	289	414	2.078
Diferencia	(+)7	(+)7	(+)2

Respecto del itinerario de los buses, la programación obtenida corresponde a cada movimiento del bus en el día de forma detallada como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5: Extracto programación de flota.

Bus Lógico	Movimiento	Plaza	Servicio	Punto Inicio	Hora Inicio	Punto Fin	Hora Fin
2	1	97	F10	Terminal	0:20:00	Cabezal 1	0:22:00
2	2	97	F10	Cabezal 1	0:22:00	Cabezal 2	0:56:00
2	3	97	F10	Cabezal 2	0:56:00	Cabezal 1	1:32:00
2	4	97	F10	Cabezal 1	1:32:00	Terminal	1:34:00
2	5	97	F10	Terminal	5:16:00	Cabezal 2	5:48:00
2	6	97	F10	Cabezal 2	5:48:00	Cabezal 1	6:28:00
2	7	97	F10	Cabezal 1	6:28:00	Terminal	6:30:00

5.4. Análisis de sensibilidad

Para comparar la estrategia de *deadheading* (DH) ante variaciones en los tiempos de viaje por estas rutas, se resuelven 3 nuevas instancias. Una de las instancias que definiremos como base, contempla que no se pueden realizar viajes en *deadheading* (Sin DH) por lo cual todos los viajes son de ida y vuelta (*round trip*). Las otras dos instancias corresponden a rutas de *deadheading* con tiempos menores de un 10% (DH 10% menos) y 50% (DH 50% menos). Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

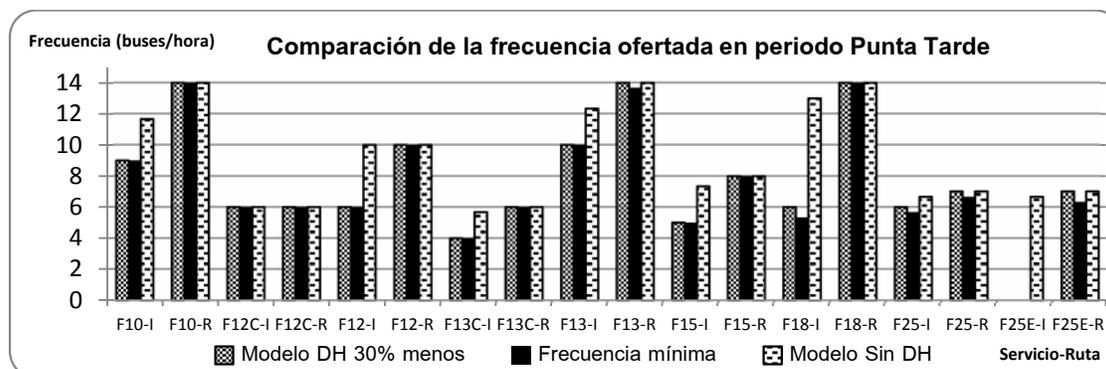
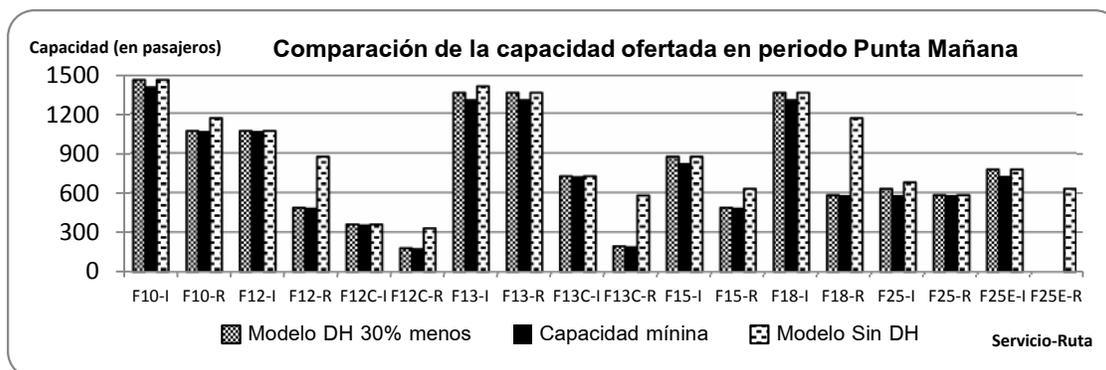
Tabla 6: Buses requeridos para cada escenario.

Escenario	Sin DH	DH 10% menos	DH 30% menos	DH 50% menos
Buses requeridos	144	142	136	131

Tabla 7: Tiempo de resolución y GAP asociados según escenario.

Escenario	Sin DH	DH 10% menos	DH 30% menos	DH 50% menos
Tiempo corrida (s)	3600	3600	3600	3600
Mejor GAP	0.00%	0.98%	0.35%	1.07%
Tiempo requerido (s)	33	630	950	650

Las Figuras 6 y 7 muestran el ajuste del DH en la capacidad de transporte y frecuencia:



Finalmente, es importante destacar que los resultados obtenidos fueron implementados el 17/06/2013. La comparación de rendimientos de indicadores de frecuencia y regularidad previos y post implementación para el terminal Juanita se presentan a continuación:

Tabla 8: Comparación de rendimientos.

Periodo	ICF Abril	ICF Mayo	ICF Junio	ICF Julio	ICF Agosto
Punta Mañana	96.0%	95.7%	96.1%	97.5%	97.9%
Punta Tarde	93.1%	92.7%	94.7%	96.4%	97.4%
Periodo	ICR-I Abril	ICR-I Mayo	ICR-I Junio	ICR-I Julio	ICR-I Agosto
Punta Mañana	90.9%	90.1%	91.3%	93.6%	92.5%
Punta Tarde	86.6%	85.4%	89.1%	92.8%	92.6%

Fuente: Información de rendimientos de ICF e ICR-I entregada por Transantiago.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha desarrollado un modelo de programación entera mixta para la segunda y tercera etapa del proceso de planificación de las operaciones del Transporte Público. Este modelo fue aplicado particularmente para la unidad de negocio 7 del Transantiago a cargo de los servicios F. El modelo propuesto integra las decisiones de horarios de viajes, asignación y programación de buses y su formulación se basa en una red expandida en el tiempo, donde la programación de los buses son caminos en la red y los viajes programados son nodos visitados por esos caminos. El modelo propuesto es lo bastante flexible para poder adaptarse a diferentes niveles de capacidad, frecuencias y tiempos de viaje, tanto para rutas comerciales como de *deadheading*.

En cuanto a la estrategia de *deadheading*, esta muestra un alto beneficio al minimizar los costos fijos de operación, los cuales están directamente relacionados al tamaño de la flota. La estrategia muestra una reducción entre un 1.4% y 9% en el tamaño de la flota comparado al escenario sin *deadheading*, por lo cual determinar rutas de *deadheading* con un tiempo mucho menor al de la ruta comercial es una tarea primordial para los concesionarios. Adicionalmente esta estrategia muestra mejores rendimientos al ajustarse a los desbalances de demanda que presentan los servicios.

Respecto de los tiempos de viaje, es importante enfatizar la importancia de los *tiempos muertos*, donde la no incorporación puede ser un factor importante en la subestimación de la flota requerida, particularmente en horarios críticos (punta mañana y tarde).

Finalmente es importante recalcar que con el enfoque propuesto la empresa ha aumentado el rendimiento de frecuencia y regularidad a corto plazo, logrando un aumento de 4% en ICF y 6% de ICR-I en el periodo punta tarde. Lo anterior tiene grandes beneficios para el usuario y la empresa, ya que por una parte se entrega un mejor servicio a los usuarios y por otra parte la empresa logra tener una planificación eficiente, reduciendo los costos y además los descuentos contractuales por incumplimientos de indicadores de ICF e ICR-I.

7. REFERENCIAS

- Banihashemi, M. and Haghani, A. (2000). Optimization model for large-scale bus transit scheduling problems. **Transportation Research Record**, Issue Number 1733, pp. 23-30.
- Ceder, A. and Tal, O. (2001). Designing synchronization into bus timetables. **Transportation Research Record**, 1760, 3-9.
- Ceder, A., Golany, B., Tal, O., 2001. Creating bus timetables with maximal synchronization. **Transportation Research Part A** 35, 913-928.
- Ceder, A., (2002) Urban transit scheduling: framework, review and examples. **J. Urban Plann. Dev.**, 128(4), 225-244.
- Ceder, A., (2002). A step function for improving transit operations planning using fixed and variable scheduling. **In Transportation and Traffic Theory (M. A. P. Taylor, ed.)**, pp. 1-21, Elsevier Ltd.
- Ceder, A., (2005). Estimation of fleet size for variable bus schedules. **Transportation Research Record**, 1903, 3-10.

- Chien, S. and Schonfeld, P. (1998) Joint Optimization of a Rail Transit Line and its Feeder Bus System. **Journal of Advanced Transportation**, 32(3), 253-284.
- Chowdhury, S.M. and Chien, S. (2001) Intermodal Transit System Coordination. **Transportation Planning and Technology**, 25(4), 257-287.
- Cordeau J-F, Laporte G, Mercier A (2001) A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. **Journal of the Operational Research Society** 52: 928- 936.
- Daduna, J. R. and Paixao, J. M. P. (1995). Vehicle scheduling for public mass transit, an overview. **In Computer-Aided Transit Scheduling**, (J. R. Daduna, I. Branco and J. M. P. Paixao, eds), pp. 76-90, Springer-Verlag.
- Dell Amico, M., Fischett, M. and Toth, P. (1993). Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem, **Management Science**, 39(1), 115-123.
- Forbes, M.A., Holt, J.N., Watts, A.M., (1994). An exact algorithm for multiple depots bus scheduling. **European Journal of Operational Research Vol. 72**, 115-124
- Haghani, A., Banihashemi, M. (2002). Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints. **Transportation Research Vol. 36A**, 309-333.
- Haghani, A., Banihashemi, M., Chiang K.H. (2003). A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models. **Transportation Research Vol. 37B**, 301-322.
- Hane, C. A., Barnhart, C., Johnson, E. L., Marsten, R., Nemhauser, G. L. and Sigismondi, G., (1995) The Fleet Assignment Problem: Solving a Large-Scale Integer Program. **Mathematical Programming Study**, Vol. 70, pp. 211-232.
- Hastie, T., Tibshirani R., y Friedman, J. (2001), **The Elements of Statistical Learning**, Springer.
- Klemmt, W. D. and Stemme, W. (1988). Schedule synchronization for public transit networks. **In Computer-Aided Transit Scheduling** (J. R. Daduna and A.Wren, eds), pp. 327-335, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 308, Springer-Verlag.
- Kwan, R. S. K. and Rahin, M. A. (1999). Object oriented bus vehicle scheduling-the BOOST system. **In Computer-Aided Transit Scheduling**. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 471 (N. H. M. Wilson, ed.), pp. 177-191, Springer-Verlag.
- Mesquita, M. and Paixão, J. M. P. (1999). Exact algorithms for the multi-depot vehicle scheduling problem based on multicommodity network flow type formulations. **In Computeraided Transit Scheduling**. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 471 (N. H. M. Wilson, ed.), pp. 221-243, Springer-Verlag.
- Pepin, A., Desaulniers, G., Hertz, A., and Huisman, D. (2006). Comparison of Heuristic Approaches for the Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem. *Odysseus*, Altea, Spain.
- Schneider J.B., Smith S.P. (1981), Redesigning urban transit system: a transit-center-based approach, *Transportation Research Record* 798, 56-65.
- Ting, C. and Schonfeld, P. (2005). Schedule Coordination in a Multiple Hub Transit Network. **J. Urban Plann. Dev.** 131, Special Issue: Urban Public Transportation world review: challenges and innovations, 112-124.
- Transantiago (2012), Página Web <http://www.transantiago.cl>
- Coordinación Transantiago (2010), **Metodología de cálculo de velocidades por servicio**, disponible en <http://www.dtpm.gob.cl/descargas/archivos/Doc>.
- Tirachini A., C.E. Cortés (2006). La estrategia Deadheading en Corredores de Transporte Público, **Actas del XIV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte**, Las Palmas de Gran Canaria, España, 20-23 Septiembre 2006.
- Wirasinghe, S. C. (2003). Initial planning for an urban transit system. **In Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning** (W. Lam and M. Bell, eds), pp. 1-29, Elsevier Ltd.