
USO DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL APOYO A LA OPERACIÓN DE UN ALIMENTADOR DE TRANSANTIAGO

Cristián E. Cortés

División Transporte, Departamento de Ingeniería Civil, FCFM, Universidad de Chile.
E-mail: ccortes@ing.uchile.cl

Pablo A. Rey, Priscila Molina, Mario Recabal

Departamento de Ingeniería Industrial, FCFM, Universidad de Chile.
E-mail: prey@dii.uchile.cl, prmolina@ing.uchile.cl, mrecabal@gmail.com

Sebastián Souyris

Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. E-mail: ssouyris@uandes.cl

RESUMEN

En este trabajo se describe un enfoque integrado de programación entera mixta (MIP) para el apoyo a la operación de una empresa a cargo de un alimentador del Transantiago. En este enfoque se divide el proceso de planificación en dos etapas: la primera integra la definición de horarios de viaje, diseño de flota y asignación de buses, mientras que la segunda se concentra en la asignación de conductores. Para la primera etapa se formula un modelo de programación entera mixta, y se estudia tanto la solución exacta como alternativas heurísticas basadas en programar primero la operación durante los horarios punta para luego generar una programación para el día completo. Con los resultados de esta primera etapa, se desarrolla un segundo modelo que se resuelve con la técnica de generación de columnas. En este caso, las columnas representan las tareas de conducción que debe realizar un chofer para una jornada de trabajo; se considera restricciones de carga de trabajo y descanso. Con el uso de este enfoque la empresa podrá operar de manera eficiente y cumplir con las condiciones impuestas por la administración del nuevo sistema de transporte público en Santiago. Los resultados preliminares obtenidos con ambos modelos son alentadores.

Palabras Claves: Transporte Público, Programación Entera, Generación de Columnas.

ABSTRACT

In this paper an integrated mixed integer programming (MIP) approach is presented for improving the operation of a company in charge of a feeder system belonging to the public transport plan in Santiago, called Transantiago. In this approach, the planning process is split in two stages: the first stage integrates the trip timetable generation, fleet design and assignment, while the second stage deals with the driver rostering. For the former stage we formulate a mixed integer problem, and the exact solution of such a problem is explored. Besides, for real-size instances, some heuristic schemes are developed based on, first, programming the operation during the peak hours, and next, on generating the schedule for the entire day. From the results of the first stage, the latter stage is developed through a second model that defines the drivers' allocation to trips, formulated under a column generation scheme. In this case, the columns represent the driver tasks to be performed during a working day; service load and break periods are considered in the formulation. This approach will allow the company to operate efficiently and to fulfill the conditions imposed by the administration of the new bus system as well. Preliminary results obtained from both models are promising.

Keywords: Public Transport, Integer Programming, Column Generation.

1. INTRODUCCIÓN

Transantiago es un programa impulsado por el Gobierno de Chile que tiene como misión implementar un nuevo sistema de transporte público, moderno, eficiente, integrado y con un buen nivel de servicio para los usuarios de Transporte Público de la ciudad de Santiago. Su implementación comenzó el 10 de febrero del presente año, y actualmente se encuentra en período de ajuste. En términos operacionales, el nuevo sistema reemplaza la estructura del sistema anterior (buses amarillos) por un esquema de recorridos troncales y alimentadores. La ciudad de Santiago ha sido dividida en 10 zonas de servicio, formadas por grupos de comunas. Dentro de cada zona existen dos tipos de servicios (recorridos), los Servicios Troncales, buses que conectan una zona con otra, cruzando los ejes más importantes de la ciudad, por los que circula la mayor cantidad de pasajeros, y los Servicios Locales o Alimentadores, buses que circulan en recorridos específicos dentro de cada zona de servicio y que acercan a los usuarios a lugares de acceso a un recorrido troncal. En el diseño final de Transantiago, se definió 5 servicios troncales y 9 locales, los cuales fueron licitados a empresas privadas, resultando finalmente en la selección de 10 empresas que se adjudicaron la operación de los distintos servicios. Un mayor detalle de la información sobre las características del sistema Transantiago, se puede encontrar en el sitio web <http://www.transantiago.cl/web2005/lici4.htm>

Este trabajo considera que la operación integral de Transantiago es estable y que se aplican las condiciones de los contratos (en particular, penalidades y multas por incumplimiento de las requerimientos de operación). Bajo tales condiciones, resulta imprescindible que cada empresa contratada se haga cargo en forma eficiente de la gestión de flota y personal. La gestión de flota puede ser en términos de planificación o a nivel operacional, esta última sólo posible si se dispone de apropiados sistemas de información en tiempo real, y por lo tanto, puede considerarse para una segunda etapa de desarrollo e implementación. En este trabajo nos concentraremos en el apoyo a la planificación de la operación. Este supuesto, si bien limita la aplicación de los modelos en la fase actual de implementación de Transantiago no resulta una limitante para cuando el sistema haya alcanzado su operación en régimen.

De acuerdo con Haghani et al. (2003), la tarea de la planificación de las operaciones de transporte público consta de cuatro pasos fundamentales: diseño de la red de transporte, diseño de los horarios de los viajes, programación los vehículos y asignación de los conductores. Así, dado que el diseño de trazados, en este trabajo se sintetiza el desarrollo de las últimas tres etapas de planificación, específicamente para una de las empresas operadoras del Transantiago, STP Santiago quien opera los Servicios Locales D y F en las comunas de Puente Alto, La Florida, Macul, Ñuñoa, La Reina y Peñalolén. Para ello se implementaron tres modelos de programación entera mixta que permiten apoyar las diferentes decisiones que deben ser tomadas al mínimo costo, satisfaciendo todas las restricciones definidas por la autoridad.

La modelación se concentra en atender las condiciones impuestas por la autoridad en la adjudicación. Ni la demanda por los servicios, ni algún indicador de calidad de servicio son explícitamente introducidos en la modelación dado que no son considerados explícitamente en los contratos. Para la demanda, se cuenta con una demanda referencial estimada por sector de servicio. Esta información ha sido considerada, pero como ciertas condiciones requeridas imponen restricciones más fuertes no es necesaria en los modelos propuestos. Sobre la calidad de servicio, se supone que los requerimientos establecidos por la autoridad consideran esta variable

y que los niveles exigidos de frecuencia representan implícitamente condiciones sobre la calidad del servicio. Es importante destacar que potenciales variaciones en los patrones de demanda debiera traducirse en otros niveles de frecuencia, capacidades y eventualmente, recorridos adicionales. En tal caso, los modelos desarrollados en el contexto de este trabajo podrán aplicarse para un escenario distinto, reflejado en nuevas restricciones de nivel de servicio (frecuencia) y capacidad, necesarias para satisfacer los nuevos patrones de demanda. Además, las variaciones de demanda en tiempo real podrán enfrentarse por medio de modelos operacionales de control y gestión de flota en tiempo real, lo que está fuera del alcance de esta investigación.

En este artículo se describen los modelos propuestos en forma cualitativa, explicando el problema que se enfrenta en cada etapa, cuales son las decisiones a tomar, la función objetivo y las restricciones más importantes de cada uno, así como el enfoque de solución adoptado. En futuras publicaciones, se detallarán las distintas formulaciones y algoritmos de solución implementados en cada caso. A continuación se describe las tres etapas que componen el problema de planificación de transporte público abordado.

2. ETAPAS ESTUDIADAS DEL PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO

Como se mencionó en la sección anterior, una vez realizado el diseño de la red de transporte público el problema de elaboración del plan de operaciones se puede dividir en tres etapas: diseño de los horarios de los viajes, programación de los vehículos y asignación de los conductores. A continuación se explica cada etapa:

2.1. Diseño de los horarios de los viajes.

En la primera etapa de planificación se debe decidir la hora de salida de un vehículo a realizar un determinado recorrido, desde que terminal se realizará ese viaje y cuál será el tipo de vehículo que deba hacer tal viaje. Para modelar este problema se utiliza una o varias redes espacio-tiempo auxiliares que se describen con mayor detalle en la Sección 3.1. Como resultado de esta etapa se conocerán todos los nodos¹ de la red(es) auxiliar(es) que representan viajes, cada uno con hora de inicio y término, un nodo de inicio y otro de llegada, y el tipo de bus que deberá realizar el viaje.

2.2. Programación los vehículos.

Este paso consiste en realizar la asignación de buses a los viajes de manera de cumplir con la realización de todos los viajes al mínimo costo posible. El costo total del uso de los buses está dado por los costos variables, en los que se debe incurrir cada vez que se realiza un viaje (operación), y por el costo fijo, que sólo se debe asumir en la realización del primer viaje de cada bus (adquisición y arriendo de buses). Notar que en esta programación sólo se considera los

¹ Algunos nodos de la red auxiliar representan viajes posibles a ser realizados. Cada uno de estos nodos tiene un punto de inicio y uno de término, y un tiempo de inicio y uno de término. La red está compuesta por otros nodos útiles a la hora de modelar el sistema (ver sec. 3.1.).

costos operacionales debido a que los niveles de servicio aceptables por la autoridad serán resguardados por las restricciones de frecuencia mínima que son agregadas al modelo.

La literatura en general trata el tema de la generación de la tabla de horarios de viajes de manera separada del de la asignación de vehículos, siendo la solución del primero un dato de entrada para el segundo problema. En el problema específico que estamos resolviendo en este trabajo, la gran cantidad de restricciones que impone el nuevo sistema de transporte no permite crear los horarios de manera independiente de la asignación de los buses, por lo que se decidió crear un modelo que integrara ambas decisiones. Por ejemplo, existen restricciones de capacidad y frecuencia por hora para cada recorrido, por lo que no es posible realizar la definición de horarios de viaje y la asignación de vehículos de manera separada, ya que al haber varios tipos de vehículos no se sabe de antemano cuál es más conveniente de utilizar.

2.3. Problema de Asignación de conductores.

Una vez definidos los itinerarios de los buses se debe asignar a estos viajes los conductores, de forma tal de minimizar los costos y respetar las restricciones contractuales. Para ello se deben generar jornadas de trabajo, indicando la secuencia de viajes a realizar, que permitan cubrir la totalidad de los viajes utilizando la menor cantidad posible de conductores. Los costos de conducción considerados aquí incluyen sueldos y pagos de horas extras.

Las restricciones contractuales que se deben cumplir son las siguientes:

- La jornada no debe superar las 10 horas diarias.
- La jornada debe incluir exactamente un descanso, cuya duración debe ser mayor a 30 minutos y menor a 1 hora.
- El descanso debe ocurrir, preferentemente, al medio de la jornada laboral
- A la semana no se debe trabajar más de 45 horas, o a lo más 57 horas pagando extra por las horas adicionales.
- Los conductores deben tener exactamente 1 día libre a la semana.

La condición de tener *exactamente* un descanso responde a requerimientos de operación de la empresa. Los contratos imponen la obligación de *al menos* un descanso de tales características durante la jornada laboral.

En la literatura relacionada (Ernst et al., 2004; Desrochers y Soumis, 1989) la forma en que se resuelve la asignación de los conductores es mediante la generación de jornadas de trabajo diarias, en que la secuencia de tareas (o viajes) a realizar sea físicamente factible, en que se respeten el máximo de horas trabajadas, y el mínimo (o máximo) tiempo de descanso, entre otras restricciones de tipo contractual.

Luego de haber generado las jornadas diarias factibles, se debe seleccionar el mejor subconjunto de ellas que permitan cubrir todos los viajes y minimicen el número de conductores necesarios para ello.

Finalmente las jornadas diarias seleccionadas se deben asignar para un horizonte de planificación mayor, respetando las restricciones de máximo de horas semanales de trabajo y de días libres a la semana, proceso conocido como *Rostering*.

3. MODELOS DESARROLLADOS

En la presente sección, se detalla los diferentes modelos desarrollados en esta investigación, para formular y resolver las tres etapas de planificación descritas en la sección anterior (diseño de los horarios de los viajes, programación de los vehículos y asignación de los conductores). Deberá notarse que las primeras dos etapas se resuelven en forma conjunta y de ellas se obtiene la programación de los vehículos que requiere el proceso de asignación de conductores y consecuente *Rostering* asociado.

3.1. Diseño de los horarios de los viajes y programación los vehículos.

Una forma de representar el modelo es a través de una red espacio-tiempo. En esta red, para cada período de tiempo t , se define un nivel que representa decisiones o actividades que se inician en ese instante de tiempo y los nodos de la red indican tales actividades. En nuestro caso, estos nodos representan si el bus, está iniciando un viaje (nodos de viaje) o está en un Terminal (nodos de terminal). Para los fines de modelación es útil contar con tres tipos de nodos de terminal que representan, respectivamente, si el bus no ha realizado viajes aún, si está esperando entre dos viajes (nodo trasbordo) o ya ha realizado todos los viajes que debía. Cada combinación de terminal con tipo de bus es representada por una red diferente, es decir, se tendrán tantas redes como combinaciones de buses y terminales existan. La Figura 2 ilustra los nodos y arcos en una red como la descrita, para el caso de un terminal d , en un período de tiempo t , y considerando un vehículo de tipo k .

Este tipo de red fue presentada por primera vez en Forbes et al. (1994), la cual no incluía nodos de trasbordo, por lo que un bus salía una sola vez del terminal y no podía regresar al terminal a esperar por otro viaje. Luego Haghani y Banihashemi (2002) la modificaron agregándole los nodos de trasbordo, para permitir que los buses regresaran al terminal durante el día. En este trabajo se agregó a la red la decisión de tener buses en espera en los terminales.

Al contar con una red de este tipo, se puede crear una secuencia de viajes para un bus particular en un día cualquiera. A este tipo de problema se le llama formulación *basada en viajes*, a diferencia de otro tipo que existe, que se conoce como *basada en bloques* (Hagani y Banihashemi, 2002). En general, el problema de asignación para varios terminales y varios buses consiste en unir los viajes consecutivos y construir itinerarios por día para cada bus, respetándose las siguientes condiciones:

- No más de un bus por viaje.
- Cada terminal tiene una capacidad limitada de buses.
- Cada bus retorna al terminal desde donde salió.
- Se minimiza los costos totales de operación.

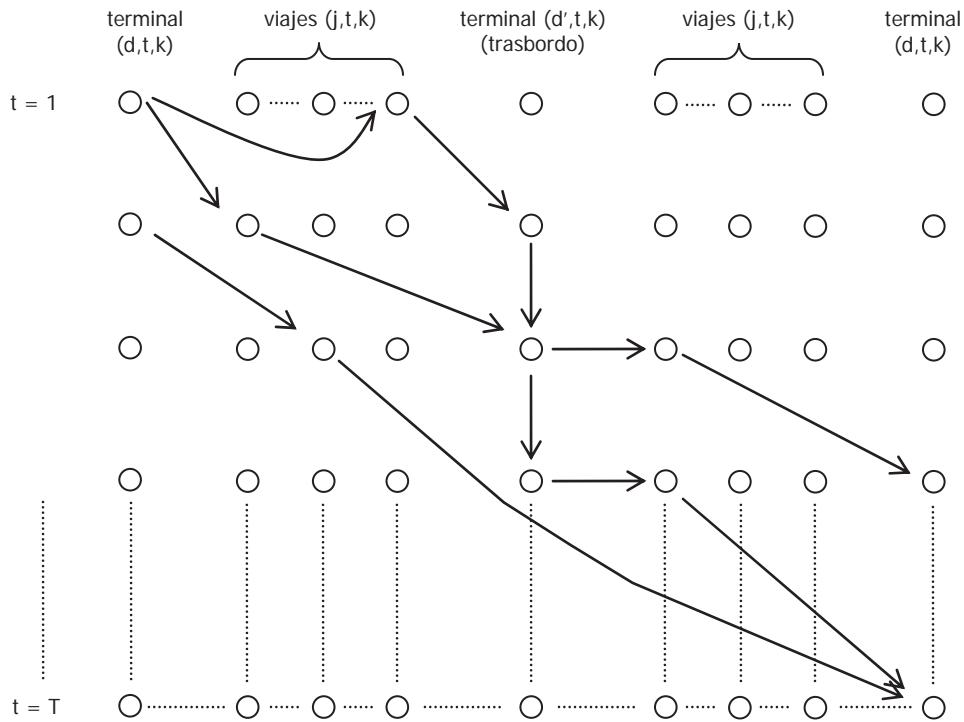


Figura 2: Red Espacio Tiempo para un terminal d y un vehículo tipo k .

En la red presentada anteriormente existen cuatro tipos de nodos, estos son viaje, terminal salida, terminal llegada y terminal trasbordo. Los nodos de viaje representarán a los recorridos que realicen los buses en sus itinerarios, con la restricción de que si se realizó el viaje j en el tiempo t el siguiente viaje a realizarse debe ser visitado en un tiempo no menor a t más el tiempo del viaje j , que será conocido ya que cada nodo de viaje pertenece a un período de tiempo y por ende se conoce con qué velocidad se realiza ese viaje. Por otro lado, los buses que se encuentren en el nodo terminal salida serán aquellos que aún no hayan realizado su primer viaje, los que estén en el nodo terminal trasbordo estarán en un estado de espera para realizar otro viaje y los buses que estén en los nodos terminal llegada serán los que ya tengan finalizado su itinerario de viajes. De esto se desprende que el camino entre un nodo terminal salida y un terminal llegada representa las actividades que un bus realiza durante una jornada y que los viajes que son programados son los que corresponden a los nodos de viaje visitados en estos caminos.

Los nodos terminal salida y llegada tendrán una capacidad dada por la cantidad de buses que quepan en el terminal y no habrá ninguna restricción para los buses que esperan en el terminal trasbordo después de un viaje, ya que el costo asociado a esto se considera hundido. El número de salidas desde los terminales salidas será igual a las llegadas a los terminales llegadas.

Los arcos que conectan al terminal salida con un viaje tendrán un costo igual al costo fijo más los costos variables de un bus y los arcos que unen al terminal trasbordo con los viajes se les imputarán sólo los costos variables, ya que el costo fijo se aplica sólo a la salida correspondiente al primer viaje. En consecuencia, la jornada de un bus tendrá sólo un arco desde un terminal salida a un viaje y los demás serán arcos que se iniciarán desde los terminales trasbordo.

Las restricciones impuestas por Transantiago son respetar las frecuencias (de salidas de buses por hora en cada recorrido), capacidades mínimas y máximas por hora para cada recorrido (necesarias para cubrir la demanda estimada) y un mínimo de plazas (el total de la capacidad de los buses sea mayor a un cierto valor). Para controlar la distribución de los buses durante una hora de un intervalo de operación imponemos intervalos de tiempo mínimo y máximo de pasada entre buses consecutivos (*headway mínimo y máximo*). En el modelo se consideró tres restricciones de operación además de las impuestas por Transantiago: los recorridos están asignados a algún Terminal, un bus no puede realizar un recorrido que no pertenece a su Terminal y un bus realizará siempre el mismo recorrido.

Los datos con los que se cuenta son: largo de los recorridos, velocidades y tiempos para el período de operación, costos de operación de los buses, los cuales se dividen en costos variables (repuestos, neumáticos, petróleo y lubricantes) y costos fijos (costo de adquisición y conductor). Con estas restricciones se formuló un modelo de programación lineal entero similar al planteado en Forbes et al. (1994) y Haghani y Banihashemi (2002), que determina que buses utilizar para cada uno de los recorridos, desde que terminales deben salir y cuando, de forma tal de minimizar los costos totales (costo fijos más costos variables) sujeto a las restricciones antes mencionadas.

El algoritmo que se utilizó para la resolución del modelo es a dos pasos. El primero, es conseguir una solución factible que satisfaga las restricciones operacionales del horario punta. Con esto, se tendrá una composición de flota que será factible para el período completo, dado que en condiciones normales el horario punta representa el período de mayor carga del sistema. Esta flota permitirá encontrar una solución factible para todo el período de operación. Una vez que se tenga este resultado, se conservará el valor de las soluciones del grupo de variables de salidas iniciales, al cual se les denotará con el conjunto \bar{I} .

El segundo paso, consiste en resolver el modelo para el período completo. En esta etapa, se agregan restricciones que llamaremos de *búsqueda local* motivadas por las definidas por Fischetti y Lodi (2003, 2005) en el contexto del método *local branching* al modelo original. Estas restricciones se aplican sólo sobre el conjunto de variables de salidas iniciales. La restricción de búsqueda local no permite realizar más de k cambios en un conjunto de variables con respecto a un conjunto solución factible que se tenga para ellas. Adicionalmente, se agrega que la restricción de búsqueda local se aplique separadamente por cada recorrido en el horario punta y sólo para el conjunto de variables de salidas iniciales en el horario punta, es decir, se permite k cambios de variables de salida inicial por cada recorrido. De esta manera, se tendrá, a los más, “ $k \times$ número de recorridos” cambios en total con respecto al conjunto inicial \bar{I} . Además, se asigna un valor igual a cero a todas las demás variables de salida iniciales que correspondan a un período de tiempo t mayor que el del horario punta. Los demás conjuntos de variables quedan libres para ser modificados.

3.2. Problema de Asignación de conductores.

En este trabajo seguimos un esquema de solución similar al utilizado en la literatura especializada (Desrochers y Soumis, 1989; Desrosiers et al. 1995; Fores et al. 1997, 2002; Huisman et al., 2003; Haase y Friberg, 1997; Haase et al. 2001; Hoffman y Padberg, 1993). Para la generación y

selección de las jornadas diarias se ha construido un modelo de programación entera donde cada columna representa una jornada a ser realizada por un único conductor. Para resolverlo, se utiliza la técnica de generación de columnas. Para ello, el problema se divide en un Problema Maestro (PM) y un Sub Problema (SP). Con el PM se selecciona el mejor subconjunto de columnas que cubran todos los viajes y minimicen el número de conductores, mientras que con el SP genera nuevas columnas que permitan mejorar la solución encontrada hasta el momento. El esquema de generación de columnas es una técnica adecuada en este problema ya que las distintas jornadas son independientes: los distintos recorridos están ligados a terminales específicos, es decir, un recorrido siempre sale y regresa al mismo terminal; y durante un mismo día se requiere que un conductor maneje un mismo recorrido, para evitar cambios y equivocaciones.

Además, la empresa cuenta con tres tipos de días laborales, por lo que se tienen también tres conjuntos de viajes para cada recorrido, un conjunto que corresponde a los viajes a realizar de Lunes a Viernes, otro para los Sábados y un último para los Domingos. Por lo tanto, el modelo es resuelto para cada recorrido en cada tipo de día. Es decir, para un mismo recorrido se correrá el modelo 3 veces, obteniéndose así 3 conjuntos de jornadas. Una vez escogidas las jornadas a realizar, estas alimentan el problema de *Rostering*, para el cual se utiliza un modelo de programación lineal entera mixto.

El PM corresponde a un problema de partición de conjuntos (*set partitioning*): hay un conjunto M de jornadas factibles, de las cuales se debe seleccionar un subconjunto de jornadas que minimicen el número de conductores (cada jornada seleccionada representa a un conductor) y que cada viaje sea cubierto por una única jornada. El conjunto de jornadas iniciales factibles para el PM considerado incluyó jornadas que cubran un único viaje, por lo que se tienen tantas columnas iniciales como número de viajes. A dichas columnas se les asignará un costo elevado (mucho mayor que 1) para evitar que sean elegidas en la solución final.

El SP genera nuevas columnas a agregar al conjunto M , de forma tal de mejorar la solución actual del PM. Las columnas a agregar deben ser “buenas columnas”, es decir, como la función objetivo es de minimización, deben ser de costo reducido negativo.

Los viajes se representan en una red, donde cada nodo corresponde a un viaje, además de dos nodos ficticios que simbolizan al terminal (nodo fuente y nodo sumidero). Existen arcos dirigidos entre pares de nodos si es factible realizar dicha secuencia de viajes, es decir los viajes no se superponen. Por lo tanto, el SP equivale a encontrar una ruta mínima desde el nodo fuente hasta el nodo sumidero, visitando los nodos viajes y respetando las restricciones del caso, es decir un problema de ruta mínima con restricción de recursos. Para ello, el SP se resolverá mediante un algoritmo de Programación Dinámica (PD), que se aplica sobre una red extendida, donde cada nodo viaje se replica según el tiempo restante de jornada por realizar, si ha tenido o no un descanso anteriormente y si será realizado en un turno de mañana o tarde. Un ejemplo gráfico de la red extendida y el problema de PD a ser resuelto se puede apreciar en Figura 3, donde con líneas punteadas se grafican los arcos y con líneas continuas una muestra de ruta mínima.

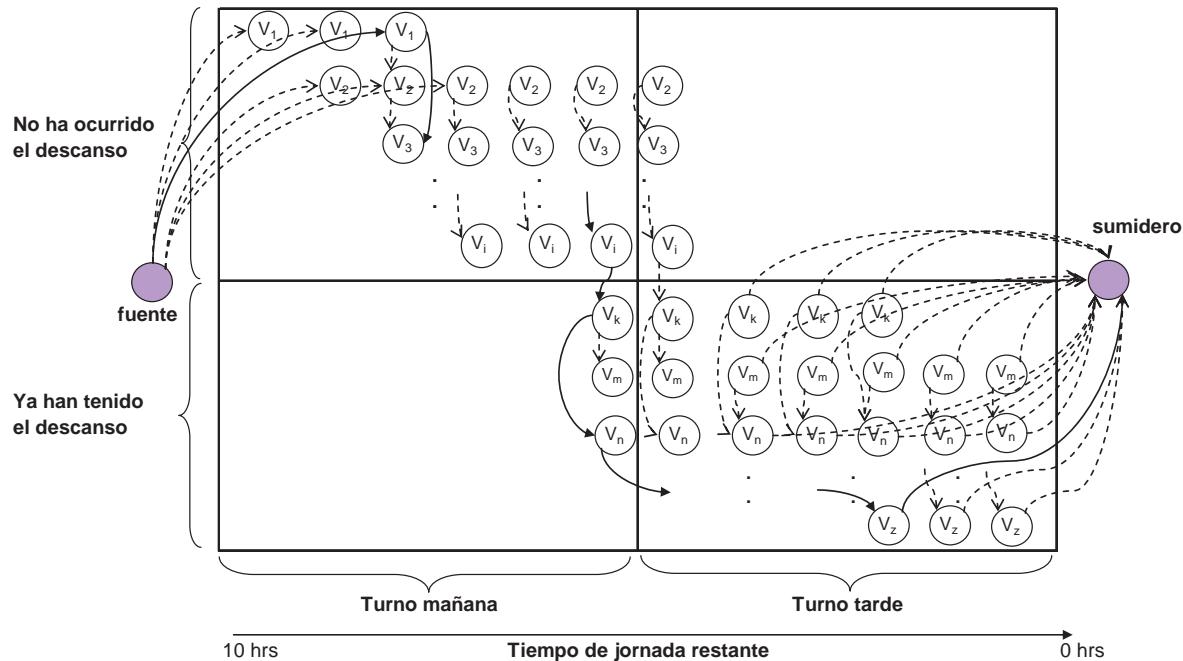


Figura 3: Red extendida del problema de Programación Dinámica.

Luego de obtener las jornadas diarias seleccionadas para los distintos días laborales el modelo de *Rostering* las asigna a los conductores para una semana completa. Para ello se implementó un modelo de programación lineal mixta que maximiza la cantidad de horas libres que tienen los conductores respetando las condiciones contractuales.

4. RESULTADOS PRELIMINARES.

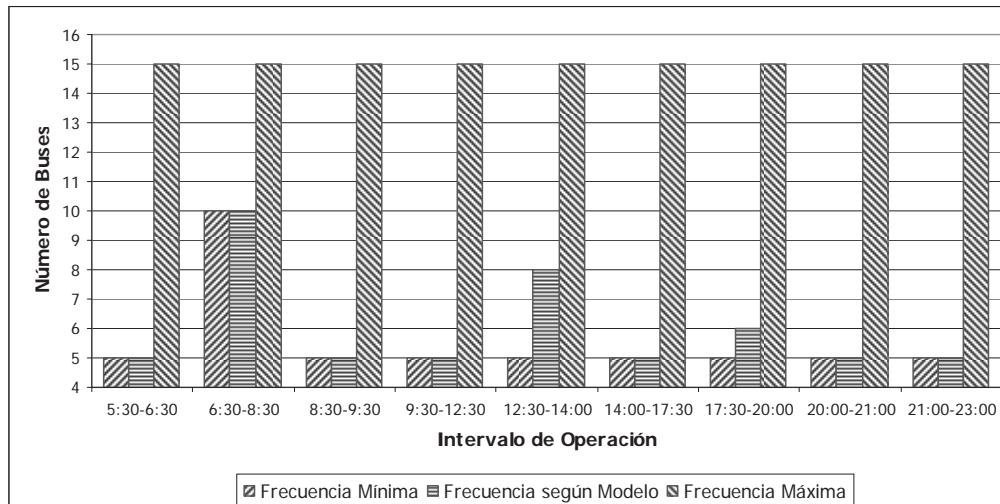
Por ahora, los modelos han sido formulados y ejecutados considerando la información de recorridos, restricciones de frecuencia, capacidades y otras, disponibles y establecidas por la autoridad para los distintos servicios que componen las zonas de operación D y F, a cargo de la empresa STP Santiago (que mueve del orden de 300 buses).

Los modelos desarrollados permiten obtener frecuencias de recorridos factibles y programación de los vehículos eficiente que aseguran responder a la demanda estimada. Por ejemplo, en Tabla 1 se muestra la planificación de la flota para el horario punta de un servicio particular (204), indicándose los buses necesarios para operar y el itinerario que cada uno de ellos debe realizar.

Tabla 1: Planificación para el recorrido 204 en el horario punta.

Hora Inicio	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7
5:39	x						
5:48		x					
5:57			x				
6:09				x			
6:18					x		
6:30	x						
6:42		x					
6:54			x				
7:03				x			
7:12					x		
7:21	x						
7:33						x	
7:45						x	
7:48		x					
8:00			x				
8:12				x			
8:24					x		
8:39	x						
8:51						x	
8:54		x					
9:06			x				
9:18				x			

Se aprecia la composición de la flota para el recorrido (7 buses), no necesariamente del mismo tipo. Se sabe además cual es el itinerario que debe realizar cada bus y cuando debe permanecer en el terminal, información que también entrega la modelación. También se puede conocer la frecuencia por hora y las capacidades resultantes. Así, de la tabla la frecuencia resultante es de 5 buses por hora entre las 5:30 y 6:30, de 6 buses por hora entre las 6:30 y 8:30 y de 5 buses por hora entre las 8:30 y 9:30. Por otro lado, apreciando las horas de salida se verá que están distribuidas de una manera uniforme a través del tiempo, lo cual se logra con la restricción de intervalos (*headway*) mínimos y máximos, ya que de lo contrario podría haber ocurrido que los 6 buses salieran juntos dejando el resto de la hora sin salidas. El modelo respeta las restricciones impuestas por Transantiago, en particular la de frecuencia y capacidad mínima y máxima. En el caso del mismo recorrido 204, la frecuencia que propone el modelo respeta las restricciones, resultando en restricciones activas respecto de frecuencias mínimas en casi todos los casos, tal como se aprecia en Figura 4.

**Figura 4. Frecuencias por Intervalos de Operación para el servicio 204.**

Junto con lo anterior se generó modelos que permiten realizar una asignación de los conductores adecuada, de forma tal de minimizar el número de conductores necesarios para responder a la frecuencia de viajes respetando las condiciones contractuales.

Por ejemplo, una parte de la asignación obtenida de un conductor en particular se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2: Asignación del conductor 11 del servicio 202.

Conductor 11 Servicio 202	Turno	Comienzo	Termino	Duración	Comienzo Descanso	Termino Descanso	Duración Descanso	Viajes					
								Salida	Regreso	Bus	Salida	Regreso	Bus
LUNES	Tarde	14:00	23:54	594	17:42	18:16	34	14:58	16:20	B50	18:16	19:48	B6
MARTES	Tarde	14:00	23:26	566	18:04	19:04	60	15:20	16:42	B4	16:42	18:04	B4
MIERCOLES	Tarde	14:00	23:54	594	17:42	18:16	34	14:58	16:20	B50	18:16	19:48	B6
JUEVES	Mañana	5:30	14:58	568	7:26	8:06	40	6:18	7:26	B4	8:06	9:38	B50
VIERNES	Tarde	14:00	23:44	584	17:06	18:04	58	15:44	17:06	B7	18:04	19:36	B4
SABADO	Mañana	6:30	15:18	528	10:42	11:16	34	7:46	9:02	B79	9:26	10:42	B79
Dia Libre	DOMINGO												

La asignación realizada define para cada conductor durante cada día de la semana que tipo de turno realizará, en que momento de la jornada tendrá su descanso, y que viajes con sus respectivos buses deberá cubrir.

5. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan dos modelos de programación entera mixta para la planificación de un sistema alimentador del plan Transantiago. El uso de estos modelos permitirá a la empresa operar de manera eficiente y cumplir con las condiciones impuestas por la administración del nuevo sistema de transporte público en Santiago. El primer modelo integra las decisiones de diseño de flota y horarios de viajes, formulado como un modelo de programación entera mixta. Con los resultados del primer modelo, se desarrolla un segundo modelo que se basa en la técnica de generación de columnas y es utilizado para definir la asignación de conductores a viajes. En toda la modelación se considera las restricciones de frecuencia, capacidad, carga de trabajo y descanso, entre otras, impuestas por la autoridad a cada operador del sistema. Los resultados preliminares obtenidos con ambos modelos muestran un potencial de aplicación no sólo a este alimentador en particular, sino que también al resto de los operadores del sistema.

Lamentablemente a la fecha de elaboración de este artículo, no ha sido posible comparar los resultados entregados por los modelos con la planificación actual en terreno, debido principalmente a los graves problemas que ha tenido la implementación del proyecto Transantiago, particularmente en relación con los problemas de información de la operación de los buses (localización y carga) que todavía no permiten hacer una adecuada gestión de flota y asignación de conductores. Actualmente en la empresa, la asignación de recorridos y viajes se ajusta manualmente con la experiencia ganada día a día. Los resultados entregados por los modelos muestran que la aplicación de estos permitiría contribuir a la mejora de los problemas de transporte que enfrentan los usuarios durante estos primeros meses de puesta en marcha del Transantiago, pero requieren necesariamente que el sistema de información para gestión de flota esté en funcionamiento, y que al menos los problemas básicos de implementación estén superados.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto FONDECYT 1061261 y por el Instituto Milenio “Sistemas Complejos de Ingeniería”.

REFERENCIAS.

- Desrochers, M. y F. Soumis (1989). A Column Generation Approach to the Urban Transit Crew Scheduling Problem. **Transportation Science** Vol. 23, No. 1.
- Desrosiers, J., Y. Dumas y M. Solomon Soumis F. (1995). Time Constrained Routing and Scheduling. **Handbook in OR & MS**, Vol. 8, Chapter 2, 35-139.
- Ernst, A.T., H. Jiang, M. Krishnamoorthy y D. Sier (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. **European Journal of Operational Research** Vol. 153, 3-27
- Forbes, M.A., J.N. Holt y A.M. Watts (1994). An exact algorithm for multiple depot bus scheduling. **European Journal of Operational Research** Vol. 72, 115-124.
- Fischetti, M. y A. Lodi (2003). Local Branching. **Mathematical Programming** Vol. 98, 23-47.
- Fischetti, M. y A. Lodi (2006). Repairing MIP infeasibility through Local Branching. **Computers and Operations Research**.
- Fores, S., L. Proll y A. Wren (1997). An Improved ILP System for Driver Scheduling. **Computer-Aided Transit Scheduling**, 43-61.
- Fores, S., L. Proll y A. Wren (2002). TRACS II: a hybrid IP/heuristic driver scheduling system for public transport. **Journal of the Operational Research Society**. Vol. 53, 1093-1100.
- Haase, K. y C. Friberg (1997). An Exact Algorithm for the Vehicle and Crew Scheduling Problem. **Computer-Aided Transit Scheduling**. 63-80.
- Haase, K., G. Desaulniers y J. Desrosiers (2001). Simultaneous Vehicle and Crew Scheduling in Urban Mass Transit Systems. **Transportation Science**, Vol. 35, No. 3, 286-303.
- Haghani, A. y M. Banihashemi (2002). Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints. **Transportation Research** Vol. 36A, 309-333.
- Haghani, A., M. Banihashemi y K.H. Chiang (2003). A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models. **Transportation Research** Vol. 37B, 301-322.
- Hoffman, K., Padberg y M. Solving. (1993). Airline Crew Scheduling Problems by Branch and Cut. **Management Science**, Vol. 39, 657-682.
- Huisman, D., R. Freling y A. Wagelmans (2003). **Multiple-Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling**. Econometric Institute Report EI2003-02, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam.