

## **ADJUDICACIÓN DE UNA LICITACIÓN PARCELADA: EL CASO DE TRANSANTIAGO**

Juan Carlos Muñoz

Departamento de Ingeniería de Transporte

Pontificia Universidad Católica de Chile

Casilla 306, Cod. 105, Santiago 22, Chile

Tel: 56-2-354 4270; Fax: 56-2-553 0281; e-mail: jcm@ing.puc.cl

Diego Molina

SECTRA

Teatinos 950 Piso 16, Santiago, Chile

Fax: 56-2-696 6477; e-mail: dmolina@sectra.cl

### **RESUMEN**

Los servicios de transporte de Transantiago se agruparon en cinco unidades de servicios estructurantes y diez de servicios alimentadores, los que fueron licitados a operadores privados en forma simultánea. Adicionalmente, previendo problemas de concentración de propiedad, se limitó el número máximo de negocios a adjudicar por operador. El presente artículo detalla los problemas de adjudicar una licitación simultánea y parcelada como la descrita, donde diferentes actores postulan a distintos negocios en una única licitación. Este artículo formula el problema general de adjudicar una licitación parcelada y simultánea como uno de flujo en redes a mínimo costo (PFRMC), lo resuelve para la licitación de servicios de Transantiago, y discute la conveniencia de abordar la licitación mediante la herramienta desarrollada

## 1. INTRODUCCIÓN

Consideremos una licitación simultánea de múltiples servicios en que cada oferente puede presentar ofertas a cuantos servicios desee. Sin embargo existen diversas restricciones que limitan el conjunto de servicios que cada oferente se puede adjudicar (por ejemplo un número máximo de servicios). Estas restricciones pueden provenir de intereses de diversificación de proveedores por parte de quien licita o por capacidad de adjudicarse servicios por parte de quien realiza una oferta múltiple. En un caso como éste, es natural que se pretenda determinar la asignación total de los servicios que optimice un determinado objetivo, por ejemplo recibir el mayor monto de dinero producto de los servicios licitados.

Determinar la adjudicación óptima, no es un problema trivial. Si bien a través de heurísticas se puede determinar una solución razonable rápidamente, nada garantiza su optimalidad. En algunos casos esta suboptimalidad podría ser costosa. Para visualizar la dificultad del problema imaginemos por ejemplo que a una licitación de varios servicios se presentan múltiples oferentes. En esta licitación cada oferente debe ofrecer montos de dinero por adjudicarse cada servicio. Además se exige que a ningún oferente se le asigne más de 1 servicio. Supongamos que un oferente realiza la mejor oferta en todos los servicios. En ese caso ¿qué unidad le asignamos? ¿aquella en que ofreció un monto mayor? Pero si en ese servicio la segunda mejor oferta es muy similar, poco se perdería por asignarla a otro oferente. Así, resulta evidente que el problema posee una naturaleza combinatorial que dificulta su solución inmediata.

El presente artículo formula el problema como uno de flujo en redes a mínimo costo lo que simplifica notablemente la complejidad del desafío y hace innecesario el uso de heurísticas si lo único que se pretende es determinar la mejor asignación posible. Esta familia de problemas es común en textos básicos de investigación operativa (ver Ahuja et al, 1993).

Dicha metodología fue desarrollada en el contexto del plan de transporte público de Santiago, Transantiago. Transantiago es uno de los doce programas del Plan de Modernización de Transporte Público de Santiago, cuyo objetivo es promover el uso estos modos, mejorando su nivel de servicio. Además se pretende reducir la contaminación y congestión propia del sistema de transporte de la ciudad. Con ello se espera mantener --e idealmente aumentar-- los actuales niveles de demanda por transporte público, a fin de revertir la tendencia observada en las últimas décadas en Santiago. Para alcanzar esta meta, se plantea como condición fundamental establecer un marco regulatorio que permita a este mercado un desarrollo sustentable, tanto desde el punto de vista de operadores y usuarios, como desde la perspectiva urbana, social y ambiental.

En este contexto, la minimización de los costos asociados al transporte público de la ciudad resulta fundamental para garantizar tarifas reducidas a los usuarios y así aumentar su atraktividad. Como primer paso para reducir los costos del sistema, se rediseñó completamente los servicios de transporte de modo de ajustar la oferta de mejor manera a la demanda por servicios. De este rediseño surgió un esquema de servicios estructurantes y articuladores del sistema de transporte público, denominados servicios troncales, y una red de servicios alimentadores de ámbito local que permiten acceder a esta red estructurante con tarificación integrada.



Con el fin de configurar unidades económicas atractivas para operadores privados y que faciliten la fiscalización, se agrupan los servicios troncales en cinco unidades y los servicios alimentadoras en diez unidades. Conceptualizado el sistema, la Autoridad en su rol de administrador concesiona la explotación económica de dichos servicios a operadores privados de transporte a través de una licitación pública. Sin embargo, previendo problemas de concentración de propiedad, la autoridad exige un número mínimo de operadores en la ciudad. Esto agregado a las capacidades de los oferentes en adjudicarse un número acotado de unidades genera el problema combinatorial ya mencionado. Las tarifas pagadas por los usuarios de transporte público en Santiago suman del orden de 700 millones de dólares anuales por lo que cualquier potencial ahorro que identifiquemos hace rentar todo esfuerzo adicional por resolver el problema.

En la sección 2 de este artículo se formula el problema general mediante programación matemática, y se analiza las eventuales modificaciones necesarias si fuera necesario discriminar entre soluciones óptimas múltiples mediante criterios de desempate. En la sección 3 se presenta la aplicación de esta metodología al caso real de la licitación de transporte público de Santiago de enero del 2005. El artículo concluye con una discusión de los resultados y principales conclusiones.

## 2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

Consideremos un proceso de licitación parcelado de un sistema. Es decir, en este proceso se ha dividido el sistema en  $q$  negocios. Estos negocios se clasifican en  $m$  clases tal que en cada clase  $k$  se ofrecen  $q_k$  negocios ( $\sum q_k = q$ ). En el proceso de licitación cada interesado puede presentar ofertas a cuántos negocios quiera pero no se le puede adjudicar más que  $n$  de ellos. Adicionalmente, para cada clase  $k$ , no se le puede adjudicar a ningún oferente más de  $n_k$  negocios.

La autoridad requiere asignar cada uno de los negocios a los oferentes de modo que todos los negocios sean asignados (evitar negocios desiertos) minimizando el costo total del sistema. Para esto, cada oferente plantea en su oferta por cada unidad el costo total a exigir por adjudicársela. Denominaremos  $s$  al total de oferentes y  $p_{ij}$  al costo que exige el oferente  $i$  por adjudicarse el negocio  $j$  (un oferente puede no presentar ofertas por todos los negocios). Adicionalmente cada oferente  $i$  informa el número máximo de negocios que desea adjudicarse,  $r_i$  y el número máximo de cada clase  $k$ ,  $r_{ik}$ .

Este problema puede plantearse como un problema de flujo en redes a mínimo costo (PFRMC). Para visualizar el modelo consideremos la Figura 1.

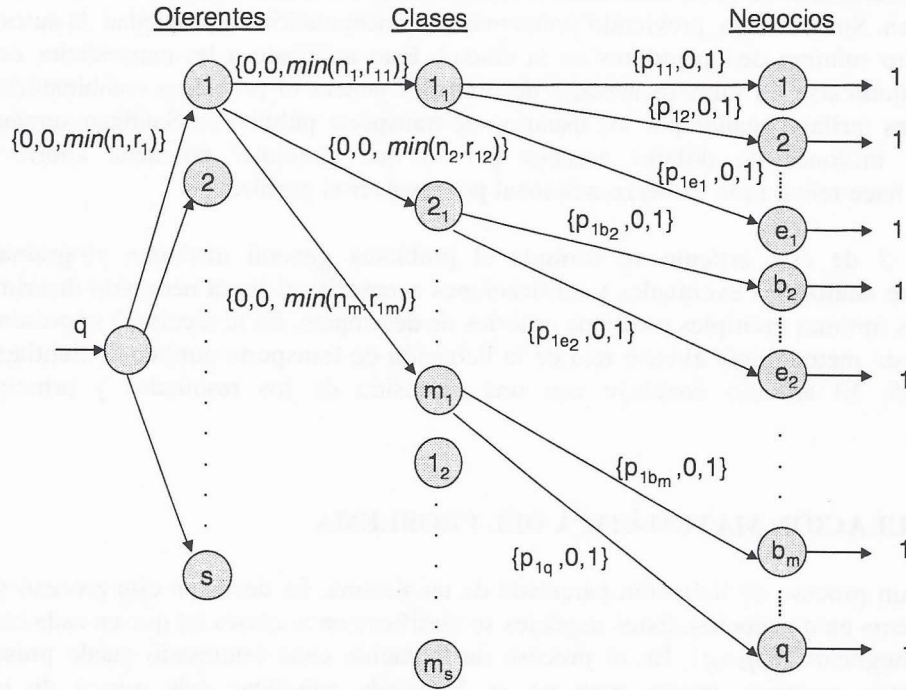


Figura 1: Diagrama de flujo

Como en todo PFRMC, cada arco de la red tiene asociado un costo unitario, un flujo mínimo y un flujo máximo. El conjunto de tres atributos asociados a cada arco en la figura corresponden a estas tres características respectivamente. En esta red se distinguen tres familias de nodos. La primera familia consiste en  $s$  nodos asociados a cada uno de los oferentes. La segunda familia está compuesta por  $s$  grupos de  $m$  nodos cada uno. Cada uno de estos grupos está asociado a uno de los nodos oferentes del primer grupo. La tercera familia está compuesta por  $q$  nodos asociados a cada uno de los negocios. Por claridad hemos asumido que en un conteo sucesivo de estos negocios, los  $q_k$  de la clase  $k$  comienzan en el número  $b_k$  y terminan en el  $e_k$  (es decir  $e_k - b_k = q_k - 1$  y  $e_{k+1} = b_k + 1$ ).

En este diagrama se contempla un flujo de  $q$  unidades a lo largo de la red que entra por un nodo común  $O$  y que sale de la red desagregado en una unidad de flujo por cada nodo de negocio reflejando el que todos los negocios deben ser adjudicados. El recorrido de una unidad de flujo desde  $O$  a un nodo de negocio refleja el oferente que se adjudica el negocio respectivo. Al comenzar, las  $q$  unidades de flujo deben dividirse hacia cada uno de los  $s$  oferentes sin sobrepasar el máximo de  $n$  para cada uno ni el máximo número de negocios que el oferente ha aceptado adjudicarse. Así, al arco  $(O, \text{oferente}_i)$  que refleja el número de negocios adjudicados al oferente  $i$  se le exige que su flujo no supere ni a  $n$  ni a  $r_i$ . El número de adjudicaciones logradas por un oferente se debe desagregar en su camino hacia algunos de los  $q$  negocios, sin embargo este

proceso debe respetar el máximo de negocios de cada clase que es posible adjudicar al oferente respectivo. Así, el flujo del arco (*oferente<sub>i</sub>, clase<sub>ki</sub>*) no puede exceder ni a  $n_i$  ni a  $r_{ik}$ . Por último, la presencia del arco (*clase<sub>ki</sub>, negocio<sub>j</sub>*) indica que el oferente  $i$  realizó una oferta por el negocio  $j$ . Su flujo será 1 si se lo adjudica y 0 si no. Para favorecer la claridad de la figura, sólo se ha dibujado todos los arcos y nodos asociados al primer oferente, restando dibujar en forma análoga los demás.

La formulación del problema a través de un PFRMC permite garantizar que la solución óptima al problema relajado (ignorando las restricciones de integralidad de las variables, es decir de los flujos por los arcos de la red) satisficará las restricciones de integralidad. Esto se debe a que todos los vértices del dominio del problema relajado son factibles para el problema original (Ahuja et al, 1993).

### 3. MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

El objetivo del problema es determinar a qué licitante adjudicar cada uno de los negocios. Definamos  $A$  como el conjunto de pares  $(i,j)$  tal que el oferente  $i$  realizó una oferta por el negocio  $j$ . A continuación, definamos las siguientes variables de decisión:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si al oferente } i \text{ se adjudica el negocio } j \\ 0 & \text{si no se le adjudica} \end{cases}, \forall (i,j) \in A$$

Además definiremos el siguiente parámetro auxiliar

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{si el negocio } j \text{ corresponde a la clase } k \\ 0 & \text{si no corresponde} \end{cases}, \forall j \in \{1, \dots, q\}, k \in \{1, \dots, m\}$$

El modelo a resolver es el siguiente:

$$\text{Min } C = \sum_{(i,j) \in A} p_{ij} x_{ij}$$

sujeto a

$$\sum_{j=1}^q x_{ij} \leq n \quad \forall i \in \{1, \dots, s\}$$

$$\sum_{j=1}^q \delta_{jk} x_{ij} \leq n_k \quad \forall i \in \{1, \dots, s\}, \forall k \in \{1, \dots, m\}$$

$$\sum_{i=1}^s x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, q\}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, s\}, \forall j \in \{1, \dots, q\}$$



La función objetivo de este modelo corresponde a la minimización de los costos totales asociados a la adjudicación. Denominaremos  $C^*$  al costo total correspondiente a la asignación óptima. Las restricciones (1) y (2) exigen que ningún oferente se adjudique más de  $n$  negocios ni más de  $n_k$  negocios de cada clase  $k$ . Las restricciones (3) exigen que todos los negocios sean adjudicados. Las restricciones (4) expresan la naturaleza binaria de las variables. Sin embargo, dado que este modelo se ajusta a la familia de PFRMC, se puede reemplazar estas restricciones simplemente por  $0 \leq x_{ij} \leq 1$  sin que esto modifique la solución óptima al problema.

A menudo las licitaciones exigen a los oferentes presentar sus ofertas  $p_{ij}$  dentro de rangos definidos como válidos. Esto permite evitar las ofertas predatorias en que  $p_{ij}$  no alcanza a cubrir los costos de operación. Estas ofertas predatorias pretenden adjudicarse un negocio para luego exigir modificaciones al contrato durante su explotación. Ante estos escenarios, es imprescindible definir un criterio de desempate. Por ejemplo, los criterios de desempate usualmente exigidos en sistemas de transporte público son antigüedad mínima de la flota, emisiones promedio mínimas de la flota, aporte monetario máximo a las reservas fiscales, etc. o una combinación de ellas. Es interesante observar que como se está asignando todos los negocios simultáneamente los empates ocurren entre asignaciones completas y no necesariamente entre oferentes individuales. Cualquiera sea el mecanismo de desempate, cada oferente deberá informar un valor asociado a la variable de desempate por cada negocio al que postule. Así, si denominamos  $p_{ij}^1$  al valor de desempate presentado por el oferente  $i$  para el negocio  $j$ , en el desempate se buscará de entre todas las asignaciones óptimas al problema original, aquella que minimice  $\sum p_{ij}^1 x_{ij}$  (sin pérdida de generalidad para funciones a maximizar). Este problema se formula del siguiente modo:

$$\text{Min } C = \sum_{(i,j) \in A} p_{ij}^1 x_{ij}$$

sujeto a

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in A} p_{ij} x_{ij} &= C^* \\ \sum_{j=1}^q x_{ij} &\leq n & \forall i \in \{1, \dots, s\} \\ \sum_{j=1}^q \delta_{jk} x_{ij} &\leq n_k & \forall i \in \{1, \dots, s\}, \forall k \in \{1, \dots, m\} \\ \sum_{i=1}^s x_{ij} &= 1 & \forall j \in \{1, \dots, q\} \\ x_{ij} &\in \{0, 1\} & \forall i \in \{1, \dots, s\}, \forall j \in \{1, \dots, q\} \end{aligned}$$

En este nuevo modelo se traslada la función objetivo original al conjunto de restricciones exigiendo que tome el valor óptimo  $C^*$ . Así, se restringe el dominio de posibilidades sólo a aquellas asignaciones óptimas al problema previo. La nueva función objetivo consiste en minimizar el criterio de desempate.

Si bien este nuevo problema pierde la estructura de PFRMC, el dominio relajado de este nuevo problema aún conserva la propiedad de que todos sus vértices son factibles para el problema no relajado. Esto se debe a que la nueva restricción limita el dominio del problema a una de las caras del dominio original por lo que el conjunto de vértices de este nuevo dominio es un subconjunto del anterior.

Si la autoridad vislumbrara la posibilidad de que la solución óptima a este segundo problema no fuera única, entonces podría exigir segundo y tercer mecanismo de desempate. En esos casos cada oferente debiera indicar  $p_{ij}^2$  y  $p_{ij}^3$  y proceder en cada etapa de forma análoga a la anteriormente expuesta.

#### **4. APLICACIÓN: LICITACIÓN DE SERVICIOS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN SANTIAGO DE CHILE.**

En el caso de Transantiago se licitaban 5 unidades troncales y 10 unidades alimentadoras. Las bases de licitación (Transantiago, 2004) establecen que cada oferente puede adjudicarse un número máximo de 2 unidades troncales y también un máximo de 4 unidades en total. Adicionalmente los oferentes podrían plantear su deseo de adjudicarse un máximo de unidades de cada tipo ya sea debido a su limitada disponibilidad de flota o a su limitada capacidad financiera. La asignación de operadores a los servicios a licitar busca minimizar los costos del sistema. Así, se enfrenta el problema de adjudicar una licitación parcelada simultánea.

En el caso de la adjudicación de Transantiago, la autoridad contaba con una herramienta para asignar las unidades minimizando los costos del sistema de acuerdo a la metodología presentada en la sección anterior, sin embargo optó por utilizar una heurística. La autoridad basó esta decisión en la transparencia que otorga al proceso una asignación secuencial de los negocios en que el procedimiento puede explicitarse paso a paso a los oferentes en forma clara, no permitiendo segundas interpretaciones. Es importante destacar que el sector microbusero de Santiago es un sector poco profesionalizado y muy atomizado. Transantiago constituía un esfuerzo ambicioso por lo que se prefirió minimizar todos los riesgos posibles producto de la adjudicación. Adicionalmente, se vislumbraban pocas ofertas múltiples lo que reducía significativamente el beneficio potencial del método exacto sobre una heurística.

La heurística a utilizar consistió en seleccionar la oferta ganadora para cada unidad de negocio en un orden predeterminado. Este orden consistía en adjudicar las 5 unidades troncales primero en orden de importancia (de acuerdo al tamaño) y continuar con las 10 alimentadoras (ordenadas de acuerdo a su tamaño). Es decir, se recibía la oferta de todos los oferentes interesados en la primera unidad a adjudicar y se escogía la mejor de ellas, acudiendo a mecanismos de desempate si fuera necesario. Una vez adjudicada una unidad se procedía a la siguiente. Si un oferente copaba su capacidad de adjudicarse unidades de un determinado tipo, se eliminaban sus ofertas para unidades aún no adjudicadas.

La mayoría de las ofertas que se recibieron en el proceso de licitación se limitaban a postular sólo a unidades alimentadoras o sólo a unidades troncales. Como resultado de la asignación de las



unidades troncales, éstas se adjudicaron al mínimo costo posible y en el mecanismo de desempate la heurística arrojó la solución óptima al problema (este buen desempeño de la heurística fue favorecido porque casi todos los oferentes presentaron ofertas sólo por el número de unidades que eran capaces de adjudicarse y que estaba permitido por bases).

Sin embargo, esto no sucedió en las ofertas por unidades alimentadoras. Al igual que en el caso de los troncales, debido al acotado rango válido de costo que se definió para las ofertas, todas las unidades troncales y alimentadoras se asignaron en el límite inferior de dicho rango. Así, el criterio de desempate jugó un rol importantísimo para adjudicar casi todas las unidades. En Transantiago el criterio de desempate de las unidades alimentadoras era el aporte monetario al sistema.

**Tabla 1: Resumen de ofertas de desempate por las unidades alimentadoras de Transantiago**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Red Bus Urbano	49.422	32.948	16.474		49.422	<b>65.896</b>			
Compañía de Servicios para la Loc.					22.431				
Servicio de Transporte de Personas				<b>67.500</b>		33.670		<b>50.145</b>	
TurMaipo Futuro				19.546					
Transporte Urbano de Santiago						3.008			0
Unión del Transporte	100.250	94.498	79.480	7.414	67.082	8.425	<b>42.186</b>	70.164	
Buses Gran Santiago	<b>134.498</b>		<b>123.410</b>						
SuBus		62.356							19.439
Comercial Nuevo Milenio		<b>151.742</b>			<b>130.755</b>				
TransAraucarias				32.160			33.880	32.160	<b>32.160</b>
Transportes Metropolitanos de Chile						3.008			
Buses La Capital							34.912		
Buses Metropolitana								31.766	0

La Tabla 1 presenta las ofertas recibidas para este criterio de desempate por cada una de las nueve unidades alimentadoras (una unidad alimentadora no recibió ofertas y debió ser declarada desierta) por parte de las 13 empresas que participaron en la licitación de estos servicios. Las columnas representan cada una de las unidades y han sido dispuestas en la figura de acuerdo al orden en que fueron adjudicadas. En negrita se destacan las ofertas ganadoras. Las primeras siete unidades fueron adjudicadas a la mejor oferta disponible. Sin embargo la octava no lo fue debido a que la empresa que presentó la mejor oferta (Unión del Transporte S.A.) había manifestado su capacidad de adjudicarse máximo una unidad y ya se le había adjudicado la unidad 7. Si en cambio las unidades 7 y 8 hubiesen sido asignadas a las empresas Buses La Capital S.A. y Unión del Transporte S.A. respectivamente la asignación hubiese recaudado UF 12.745 adicionales. Días más tarde se sabía que la oferta de Buses La Capital S.A. había presentado una oferta incompleta por lo que sería descalificada del proceso. Así, en definitiva el mecanismo de adjudicación vía heurística arrojó una solución óptima, sin embargo el proceso ilustra las ventajas de un método exacto.



## 5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En el presente artículo se formula el problema de adjudicar una licitación parcelada y simultánea de negocios. Dicha formulación pertenece a la familia de problemas de flujo en redes a mínimo costo lo que reduce significativamente la complejidad del problema. Así, tanto su solución como la de los eventuales desempates pueden obtenerse mediante la resolución de un problema de optimización lineal continua.

Dicha metodología fue desarrollada para efectos de la licitación de recorridos de transporte público de Santiago, Transantiago, sin embargo es aplicable a cualquier proceso de licitación parcelada de asignación simultánea.

En el caso de Transantiago, a pesar de contar con esta herramienta, la autoridad de transporte público de Santiago optó por adjudicar los negocios en la licitación mediante una heurística muy simple. En esta decisión primó la transparencia y claridad del proceso por sobre el eventual costo adicional para el sistema producto de una asignación subóptima. La prioridad por la transparencia se debió a que se trataba de una licitación que involucraba numerosos riesgos políticos y técnicos. Se trataba de un rediseño nuevo que abarcaba toda la ciudad y que se licitaba bajo condiciones nunca antes vistas en Chile. Adicionalmente el proceso había sido muy resistido por los empresarios incumbentes que si bien poseían experiencia en operación de servicios de transporte, carecían de experiencia empresarial formal. Se supuso que estos empresarios desconfiarían de un sistema de asignación mediante una "caja negra". Así, se optó por evitar un riesgo adicional para un proceso frágil, lo que resulta comprensible para el contexto de la licitación.

Afortunadamente, la aplicación de la heurística redundó en definitiva en la solución óptima. Sin embargo, si una de las ofertas no hubiese sido descalificada por motivos administrativos, el aporte de los adjudicatarios al fisco hubiese sido 12.745 UF superior (aproximadamente US\$ 350.000) lo que demuestra la utilidad de un mecanismo de asignación óptimo como el presentado en este artículo.

El problema de adjudicación ha sido convenientemente formulado como un problema de flujo en redes a mínimo costo. Sin embargo, es posible que los procesos de licitación como los descritos contemplen restricciones adicionales que impidan este tipo de formulación. En particular durante el diseño de las bases de Transantiago, a menudo se solicitó que los oferentes pudieran presentar no sólo ofertas individuales por cada unidad de negocio sino también ofertas combinadas. En estos casos el oferente presenta una oferta que no es idéntica a la suma de las ofertas individuales. Esto se debe a que el oferente podría observar economías de escala o de integración horizontal al poseer más de un negocio. En particular, varios participantes en el proceso manifestaron su intención de adjudicarse un troncal y sus alimentadoras principales. Esto les permitiría consolidar la operación de estas tres unidades en un solo operador, facilitando los transbordos para el usuario y reduciendo costos de operación, flota y terminales. Si las bases de licitación aceptan este tipo de ofertas, lo que podría reducir aún más los costos del sistema, el problema (en general) ya no sería formulable como uno de flujo en redes a mínimo costo y por lo tanto la complejidad del problema se elevaría significativamente.

## REFERENCIAS

Ahuja RK, T.L. Magnanti y J.B. Orlin (1993) **Network Flows: Theory, Algorithms and Applications**. Prentice Hall, Englewood Clis, New Jersey, 1993

Transantiago (2004) Bases de licitación de vías de Transantiago. [www.transantiago.cl](http://www.transantiago.cl)