

## UNA METODOLOGIA PARA EL DISEÑO TOPOLOGICO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PUBLICO URBANO DE PASAJEROS

J. Enrique Fernández L., Joaquín de Cea Ch.  
Departamento de Ingeniería de Transporte  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Casilla 306, Santiago 22, Chile,  
Fax: (56-2) 686 4818;  
e-mail: [jef@ing.puc.cl](mailto:jef@ing.puc.cl)

Ignacio Norambuena M.  
Fernández & De Cea Ingenieros Ltda.  
Lota 2257, Of. 402, Santiago, Chile,  
Fax: (56-2) 234 1578;  
e-mail: [inorambuena@FDCconsult.com](mailto:inorambuena@FDCconsult.com)

### RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para resolver el problema de diseño topológico de un sistema de transporte público urbano de pasajeros. La metodología presentada, a diferencia de las que se pueden encontrar en la literatura existente, utiliza información que es posible obtener de la situación actual del sistema. La metodología presentada se basa en la interacción de un conjunto de heurísticas, cuya aplicación sigue un orden propuesto, el que puede ser modificado por el planificador si éste lo estima adecuado. Primero se presenta cada heurística por separado y luego se presentan algunos ejemplos de aplicación sobre una red del tamaño de una gran ciudad, como Santiago de Chile.

## 1. INTRODUCCION

Un tópico importante en el desarrollo urbano actual es el diseño de sistemas de transporte adecuados a la estructura urbana de cada ciudad. La implicancia de un diseño adecuado de estos sistemas es clave, dado que un largo tiempo sin planificación en esta área ha dado resultados negativos, empeorando progresivamente la calidad de los sistemas. En este sentido es claro que diferentes estructuras topológicas de transporte público pueden mejorar o empeorar sustantivamente la calidad de vida en una ciudad. El problema de diseño de redes de transporte público es de una complejidad combinatorial. En virtud de lo anterior, se han propuesto algunas heurísticas que permiten encontrar soluciones factibles razonables (Ceder y Wilson, 1986; Baaj y Mahmassani, 1995; Lee, 1998). Los enfoques citados anteriormente intentan solucionar el problema desde una perspectiva de programación matemática. Por lo tanto, ellos esperan que la heurística sea capaz de encontrar las estructuras óptimas, partiendo de una solución inicial en que no existen recorridos en el sistema. En éste artículo se utiliza un enfoque distinto, que utiliza información correspondiente a la estructura actual de recorridos y de los flujos observados sobre ellos.

El problema de diseño de redes de transporte público de pasajeros se puede separar en dos partes: i) el diseño topológico que corresponde a la determinación de las rutas de los servicios, y ii) el diseño operacional que realiza la optimización de las características operacionales de estos, cómo su frecuencia y capacidad. En este artículo se presenta un método heurístico para resolver el problema de diseño topológico<sup>1</sup>. El desarrollo de metodologías para el diseño topológico de sistemas de transporte público ha sido poco tratado en la literatura. Newell (1979) y, posteriormente, Jara y Gschwender (1999) han estudiado algunos aspectos de este tema. No obstante, los modelos planteados son extremadamente simples para su uso en aplicaciones prácticas. El objetivo de este artículo es formalizar un método para la determinación de las distintas configuraciones de servicios de transporte público, que pueden utilizarse en un sistema real.

La metodología propuesta se enfoca en la generación de un sistema de transporte basado en la interacción de dos tipos de servicios complementarios: i) Servicios Troncales y ii) Servicios Alimentadores. Los primeros, son servicios de alto estándar<sup>2</sup> operacional con capacidad para transportar gran cantidad de pasajeros y que operan sobre las vías más importantes de la red, cuyo trazado cubre un sector amplio de la ciudad. Los segundos, corresponden a servicios de menor estándar, que operan sobre un área reducida, y su función principal es transportar a los usuarios entre su origen y los servicios troncales. La metodología desarrollada se basa en cuatro heurísticas distintas, las cuales se separan en tres grupos:

- i.- Tipo 1.- tiene como objetivo la generación de la red troncal y los recorridos sobre ella.
- ii.- Tipo 2.- corresponde a la heurística que genera los recorridos alimentadores a la red troncal.
- iii.- Tipo 3.- corresponde a dos heurísticas complementarias que permiten el ajuste y mejoramiento de las soluciones generadas por las heurísticas anteriores.

---

1 Un análisis del problema de diseño operacional se puede encontrar en "Análisis de Modernización de Transporte Público, V Etapa", SECTRA (2003).

2 Por ejemplo, metro, tranvía, buses en corredor segregado, etc.

El presente trabajo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se presentan las distintas heurísticas y sus características individuales. En la sección 3 se analiza el orden de aplicación de las distintas heurísticas. La sección 4 muestra algunas aplicaciones prácticas de la metodología propuesta. Finalmente, en la sección 5 se exponen las principales conclusiones del análisis realizado.

## **2. HEURISTICAS PARA LA GENERACION DE SERVICIOS EN UN SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE PUBLICO**

A fin de definir todos los servicios de un sistema integrado de transporte público, es necesario utilizar tres tipos de heurísticas que describiremos en la presente sección: i) heurística para la generación de los servicios del sector troncal, ii) heurística para la generación de los servicios alimentadores y iii) heurísticas complementarias.

### **2.1. Diseño de los Servicios Troncales (DFES)**

La heurística de generación de servicios troncales requiere, en una primera instancia, la definición del conjunto de todos los ejes troncales potenciales a considerar en la ciudad. Para apoyar esta decisión se debe utilizar un catastro del flujos actuales en pax/hr sobre los distintos arcos de la red. A partir de esta información, se selecciona aquellos ejes que presenten un flujo de pasajeros que sobrepase una cierta cantidad predeterminedada. En una primera etapa, cada eje se establece como un corredor independiente de transporte público, con un servicio único que opera con una frecuencia única sobre la extensión total del trazado considerado.

El conjunto de servicios troncales obtenido es eficiente en términos del uso de los recursos del operador, no obstante, presentara en general un alto número de transbordos. Una forma de reducir este sistema es identificar aquellos pares O-D con alta demanda directa que están siendo servidos por una combinación de dos o más servicios troncales.

Para introducir dichos servicios troncales multi-corredor, es necesario detectar aquellas combinaciones de recorridos troncales que generan un mayor número de transbordos entre ellos. Para cada par detectado se genera un nuevo recorrido, "fusionando" los trazados de los servicios troncales involucrados, con el cuidado de generar para cada servicio de ida, el servicio de retorno correspondiente. La obtención de estos pares de servicios requiere una codificación desagregada de los arcos de transbordo entre corredores, de tal forma que se puede identificar de manera unívoca el número de transbordos entre un recorrido y otro en un punto dado. La explicación exhaustiva de esta desagregación (realizada automáticamente por la heurística) queda fuera del ámbito de este trabajo.

En una primera etapa de análisis, los nuevos servicios se agregan sin eliminar los recorridos mono-corredor existentes, aunque sean redundantes<sup>3</sup>. La aplicación sucesiva de esta metodología (repetición en etapas) puede generar recorridos que operen sobre más de dos corredores (servicios

---

<sup>3</sup> La eliminación de recorridos redundantes se puede producir posteriormente, si es que se justifica, a través de la heurística de eliminación de recorridos.

multicorredor). Nótese que el número de corredores directos multicorredor generados dependerá del nivel de transbordos que se defina como necesario para generar un recorrido directo.

Es posible que en la estructura final de recorridos generada, uno o más recorridos sean susceptibles de ser eliminados por baja carga, o modificados (alargados o truncados), obteniendo así una solución más eficiente. Este ajuste se realiza con la heurística de fraccionamiento y reducción de recorridos, con la ayuda de los programas de diseño operacional.

## 2.2. Diseño de los Servicios Alimentadores(DFAL)

Para el tratamiento del sector alimentador se debe partir de la definición de corredores troncales efectuada en el punto anterior. La mayoría de los servicios en un sistema no integrado (como el existente en Santiago) utiliza en una parte de su trazado arcos de los corredores troncales. Si se elimina dichos arcos de cada servicio, y se genera un nuevo servicio con cada fracción del recorrido original, se puede obtener una gran cantidad de "candidatos" a servicios alimentadores. Luego, se eliminan aquellos servicios cuya longitud es menor a un valor dado. Esto permite eliminar aquellos servicios cuyo largo es insuficiente para constituir un recorrido factible. También se depuran aquellos servicios cuyos trazados son idénticos o están contenidos en otro trazado.

A continuación, se añade los servicios resultantes al sistema de la red troncal generada en el punto anterior. Mediante la heurística de eliminación de servicios se retira los servicios que no son necesarios. Esto permite obtener un buen conjunto de servicios alimentadores que puede ser revisado más en detalle analizando cada caso en particular<sup>4</sup>.

## 2.3. Heurística de Fraccionamiento y Reducción (HFR)

El próximo paso consiste en la aplicación de una heurística (HFR) que realiza un análisis detallado de cada servicio, acortando su trazado, alargándolo, o fraccionándolo en varios subrecorridos, si esto resulta eficiente. La eficiencia se revisa utilizando un enfoque microeconómico para evaluar el resultado esperado del acortamiento/fraccionamiento. El análisis que se realiza a continuación se basa en que recorridos largos con las mismas características operacionales sobre todo el trazado, no son eficientes cuando su perfil de carga no es homogéneo. En general, existen tres estructuras distintas de recorridos para cubrir la demanda por viajes sobre un trazado dado, como se muestra en la Figura 1<sup>5</sup>.

La estructura más simple corresponde a establecer características operacionales únicas y homogéneas sobre todo el trazado del recorrido<sup>6</sup>. Este tipo de recorrido tiene la ventaja de evitar los transbordos y reducir el tiempo de espera en los tramos de baja demanda. Como contrapunto, presenta un mal ajuste a la demanda y por lo tanto ineficiencia en el uso de los factores

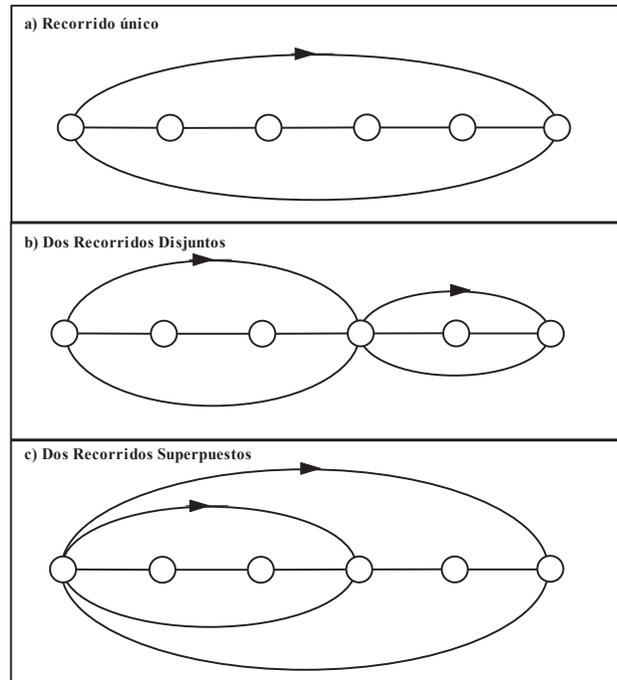
4 Dicha revisión puede ser realizada con ayuda con el uso de las heurísticas complementarias y/o de un sistema de información geográfico (SIG).

5 La comparación y análisis algebraico de dichas configuraciones se puede encontrar en Norambuena (2002).

6 Éste es el tipo de recorrido comúnmente utilizado en capitales de países en desarrollo, como la ciudad de Santiago.

productivos del operador. Además, ello implica tiempos mayores de viaje en algunos sectores congestionados.

La segunda estructura (que puede ser entendida como el otro extremo posible), corresponde a utilizar dos recorridos<sup>7</sup> complementarios, de manera que el primero cubre el sector de alta demanda y el segundo el sector de baja demanda. Esta posibilidad implica introducir transbordos, pero logra un mejor uso de los factores productivos. Ambos sectores pueden también utilizar diferentes tecnologías o tipos de vehículos a fin de realizar una operación eficiente para el nivel de demanda correspondiente.



**Figura 1: Modalidades de Operación Sobre el Mismo Trazado**

La última estructura trata de combinar las ventajas de las dos anteriores. Ella corresponde a utilizar dos recorridos diferentes superpuestos, de manera que un recorrido cubre el trazado completo y el otro opera sólo sobre el sector de alta demanda, cubriendo el exceso de demanda que no es cubierto por el primer recorrido. Este tipo de recorridos produce un menor número de transbordos que la utilización de dos recorridos disjuntos e implica una mayor eficiencia en el uso de los recursos que la alternativa de un recorrido único.

La heurística HFR estudia cuál de las tres estructuras es más eficiente para un trazado en particular, dada la carga sobre el recorrido. A partir de su aplicación, es posible además corregir y ajustar de mejor manera los recorridos, ya que permite el fraccionamiento y creación de recorridos, y el acortamiento de ellos, cuando al aplicar la heurística se obtiene una estructura de dos recorridos, uno de los cuales presenta una frecuencia cercana a cero.

<sup>7</sup> La utilización de dos recorridos en esta aplicación puede ser generalizada al caso de "n" recorridos repitiendo el procedimiento "n-1" veces.

La comparación de las distintas estructuras, se basa en el cálculo del costo social esperado de cada configuración. Los elementos de costo que se consideran en este análisis corresponden a los utilizados en las otras etapas del análisis de diseño. Para el operador, se considera los costos de operación de los vehículos. Para los usuarios, se considera el tiempo de espera, de viaje y de acceso. Para consistencia del análisis, deben utilizarse los mismos parámetros para el cálculo del costo total en las heurísticas de Diseño Físico, que los usados en el algoritmo de Diseño Operacional.

El cálculo del costo total esperado de una línea requiere de un valor para la frecuencia ( $f$ ) de cada servicio. La expresión utilizada es consistente con la estructura de costos considerada en este trabajo, que incluye el costo de operación del servicio (por vehículo-kilómetro), y el tiempo de viaje, espera, acceso y transbordos para los usuarios de éste<sup>8</sup>:

$$f^{O*} = \sqrt{\frac{\phi_{\text{esp}} \lambda Y}{C_{\text{op}} L}} \quad (1)$$

donde  $\phi_{\text{esp}}$  es el valor del tiempo de espera,  $\lambda$  el parámetro del tiempo de espera fijo (que vale 1 cuando el intervalo entre los vehículos es fijo y  $\frac{1}{2}$  si es aleatorio) y  $C_{\text{op}}$  el costo de operación del sistema. "L" corresponde al largo del trazado del servicio e "Y" corresponde a la afluencia del servicio.

#### 2.4. Heurística de Eliminación de Recorridos (HE)

Al diseñar un sistema de transporte es importante evitar definir recorridos que no sean necesarios. La heurística HE se preocupa de eliminar aquellos recorridos que no son necesarios para la adecuada operación del sistema. Dichos recorridos en general son redundantes con otros y no aportan accesibilidad adicional a los usuarios. Se interpreta que un valor bajo de la frecuencia óptima calculada implica que el sistema no requiere dicha línea.

Para obtener las líneas candidatas a la eliminación es necesario aplicar el algoritmo de diseño operacional EDO<sup>9</sup>, que determina la frecuencia óptima del sistema de recorridos planteado. Se definen como candidatas a eliminación aquellos recorridos que resultan con una "frecuencia óptima" menor a un nivel mínimo predeterminado  $\varepsilon$  durante un número de iteraciones pre-establecido del algoritmo de diseño operacional. No se permite eliminar un recorrido que deje desconectada una zona de la red. Se debe comprobar además que tanto el servicio de ida como el de retorno sean candidatas a la eliminación. De lo contrario el servicio no debe eliminarse ya que la baja frecuencia de uno de los servicios puede ser fruto de la asimetría de flujos típica de los servicios en ciertos períodos.

### 3. METODOLOGIA DE APLICACION DEL MODELO DE DISEÑO FISICO

La metodología propuesta consiste en la aplicación sucesiva, de los módulos presentados en la secciones anteriores, permitiendo la repetición de etapas y el retorno a una etapa anterior según

<sup>8</sup> Esta expresión siguiente es muy similar a la propuesta por Mohrig (1972)

<sup>9</sup> Abreviación de "Extended Descomposit Optimization". Para más información ver SPECTRA (2003).

sea el resultado obtenido en cada caso. No existe un criterio fijo para detenerse en una etapa dada (criterio de parada), sólo existe una recomendación general basada en los resultados obtenidos en cada caso. Sin embargo es posible establecer un enfoque general para la aplicación de los distintos módulos, la que puede seguirse con cierta libertad.

La primera etapa consiste en la definición de la red de corredores troncales aplicando la metodología presentada en la sección 2.1. A continuación se define un servicio único para cada corredor<sup>10</sup>. A continuación, se usa la heurística **DFAL** para definir el conjunto de servicios alimentadores necesarios para conectar las distintas zonas de la ciudad al sub-sistema troncal. En este punto es necesaria una revisión adecuada de los recorridos obtenidos, la que se realiza con ayuda de un **SIG**.

Sobre el sistema recién descrito se aplica el módulo **DFES**. Dicho módulo genera recorridos multicorredor, mediante la fusión de recorridos complementarios que presentan elevado número de transbordos. Esto implica, por ejemplo, que la generación de un recorrido que pase por tres corredores estructurales requiere la aplicación sucesiva de la heurística **DFES**<sup>11</sup>. El número requerido de aplicaciones sucesivas de **DFES** dependerá en general del valor del parámetro *mu* que define el número de transbordos aceptables, para el analista.

En este punto se debe ocupar alternativamente los módulos **HFR** y **HE** eliminando los servicios que no son necesarios y acortando los recorridos que sea necesario. Sobre la red obtenida se puede volver a aplicar los módulos **DFES** y **HFR**, lo que permite ajustar los servicios generados o se podría probar la inclusión de nuevos recorridos alimentadores<sup>12</sup>. La evolución del proceso heurístico descrito es guiada por los valores obtenidos para la función objetivo en cada iteración del proceso. Dicha función objetivo que se utiliza en la determinación de las características operacionales del sistema de recorridos definido, considera el costo total social del sistema: costo de operación del sub sistema de transporte público, costo de operación de los automóviles privados y costos de tiempo de viaje (acceso, espera y viaje en vehículo) de los usuarios de transporte público y privado.

## 4. EJEMPLOS DE APLICACION DE LA METODOLOGIA PRESENTADA

### 4.1. Determinación de Ejes Troncales

El siguiente análisis se realizó sobre el sistema de transporte de la ciudad de Santiago, usando una red con 409 zonas, 2.042 nodos, 8.267 arcos y 741 líneas de bus. Para dicho análisis se utiliza la matriz de viajes en modo bus estimada para el año 2005, la cual presenta un total de 584.833 viajes en el período de modelación, correspondiente a una hora del período punta mañana (7:30 – 8:30). La situación considera la red actual de metro sin los proyectos de extensión que se encuentran en construcción, ni otros proyectos adicionales.

<sup>10</sup> Es decir, sobre cada eje troncal existe un único recorrido en cada sentido.

<sup>11</sup> Dado que la primera aplicación genera recorridos sobre dos corredores estructurales. Una aplicación sucesiva del módulo **DFES**, puede fusionar un recorrido que sirve a dos corredores estructurales con uno que sirve sólo a un corredor, generando un recorrido que sirve a tres sectores estructurales.

<sup>12</sup> Notar que el módulo **DFAL** recibe como entrada los arcos estructurales predefinidos. Por lo tanto, si no cambian dichos arcos, no tiene sentido volver a correr dicho módulo. Los nuevos recorridos alimentadores pueden ser un subconjunto (o todos) de aquellos recorridos que fueron eliminados en la primera generación de servicios alimentadores.

Usando el del módulo artp3\_rc de ESTRAUS se obtuvo el flujo (pax/hr) sobre cada arco de la red, que es utilizado por servicios de transporte público en la actualidad. Usando la frecuencia de los servicios correspondientes multiplicada por la capacidad de los vehículos se calculó la capacidad ofrecida en cada arco. Sobre la base de los resultados obtenidos, se seleccionó el siguiente conjunto de 12 ejes, correspondientes a los corredores con mayor flujo:

- Pajaritos.
- José Joaquín Pérez – Mapocho.
- Independencia – Bandera
- Recoleta – San Antonio.
- Gran Avenida – San Diego.
- S.Francisco - Sta.Rosa.
- V.Mackenna.
- Los Leones - Av. Macul - Av. La Florida.
- Larraín - Irrazábal - 10 de Julio.
- Apoquindo - Las Condes.
- Alameda – Apoquindo
- Circunvalación Anillo Interno (Departamental – Las Rejas – Sergio Valdovinos – Roma – Dorsal).

Los ejes seleccionados se muestran gráficamente, en la Figura 2. En los experimentos que se muestran a continuación, los módulos se ejecutan en forma aislada sin seguir la secuencia de pasos indicados en la sección 3, ya que el objetivo es mostrar el funcionamiento de los algoritmos en un caso real. Por lo tanto, los resultados mostrados no deben considerarse soluciones al problema de diseño, ya que ello queda fuera del alcance de este trabajo.

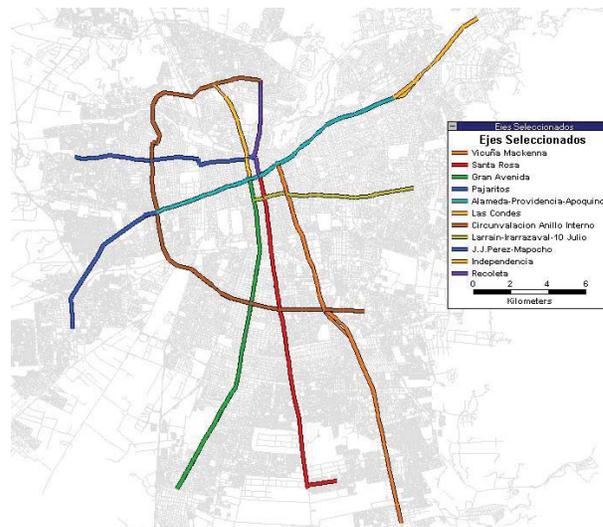


Figura 2: Ejes Seleccionados Como Corredores Troncales

#### 4.2. Pruebas Módulo DFES

Para la realización de las pruebas con el módulo DFES, se usó el conjunto de 12 corredores seleccionados en la sección anterior, sobre los cuales se definieron servicios monocorredor. Para lograr la conectividad a la red de todas las zonas, se conectó cada centroide de la ciudad a los paraderos de los corredores estructurales más cercanos, mediante arcos de acceso. Estos arcos permiten modelar *preliminarmente* (en forma simplificada) los servicios alimentadores que debe incluir la solución final. Se realizaron 4 simulaciones con el módulo **DFES** a fin de estudiar el comportamiento del módulo frente a distintos valores del parámetro *mu*, que especifica el número

de transbordos a partir del cual se debe generar un nuevo recorrido multicorredor directo. Los resultados se muestran en la Tabla 1. Como se ve, en la medida que  $\mu$  crece, el número de recorridos bicorredor generados es menor. Sin embargo, se puede observar que más de la mitad de los casos corresponden a más de 5000 transbordos.

**Tabla 1**  
**Resultados Corridas Módulo DFES**

Valores de $\mu$	Recorridos Generados
1000 (pas/hr)	114
3000 (pas/hr)	97
5000 (pas/hr)	63

A continuación se ejecutó el Modelo de Diseño Operacional para cada nueva configuración de recorridos obtenida. Cada simulación realizó 20 iteraciones del algoritmo. En promedio, el tiempo de ejecución del algoritmo fue de dos horas y media en un PC Pentium 4 de 2Ghz., con 1 Gb. de memoria RAM, con sistema operativo LINUX. Todas las pruebas se realizaron en este computador.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para las componentes de costo más importantes<sup>13</sup>, correspondiente a la mejor solución de diseño operacional para cada estructura de recorridos (diseño físico para cada valor de  $\mu$ ):

**Tabla 2**  
**Resultados de Modelo de Diseño Operacional Sobre Sistema de Transporte Público Generados con DFES**

Tipo de Recorridos	S.Monocorredor	Servicios Monocorredor y Bicorredor		
	Base	1000 pas/hr	3000 pas/hr	5000 pas/hr
Parámetro ( $\mu$ ) para Generación de Recorridos				
Valor Función Objetivo (\$):	1.435.866.100	1.405.749.000	1.406.576.000	1.391.818.400
Tiempo viaje (incluido transbordo) tpte. publico (\$):	779.984.400	740.310.800	742.762.900	733.475.100
Tiempo espera tpte. publico (\$):	19.252.820	17.051.890	14.483.600	12.726.690
Tiempo acceso tpte. publico (\$):	56.595.730	56.629.972	56.604.872	56.601.144
Costos operacion tpte. publico (\$)	18.133.080	22.282.940	22.043.660	20.577.710
Numero total de transbordos (bus)	532.796	185.426	181.193	234.105
Numero promedio de etapas de viaje(bus)	1,9	1,3	1,3	1,4

Como se puede ver en la Tabla 2, en la medida que aumenta el valor del umbral  $\mu$  el valor de la función objetivo es menor. Estudiando las partes de la función objetivo, se ve que el tiempo de espera, el costo de operación y el tiempo de viaje descienden al aumentar el umbral  $\mu$ , mientras el número de transbordos se incrementa levemente<sup>14</sup>. Notar que con 5000 pas/hr se obtiene el menor valor en la función objetivo del tiempo de viaje, espera y acceso<sup>15</sup>.

Consistente con lo esperado, en el sistema con servicios multicorredor existe un número menor de transbordos que en el sistema con servicios monocorredor. Esto produce un costo menor de tiempo de espera, ya que los usuarios que transbordan deben incurrir en un tiempo de espera

13 Para el cálculo de la función objetivo se utilizó los siguientes valores: 262,5 \$/km para el costo de operación de los buses, 92,5\$/km para el costo de operación de los automóviles, 12 \$/min para el valor del tiempo de viaje, 24 \$/min para el tiempo de espera y 36 \$/min para el tiempo de caminata.

14 La excepción al comparar los resultados con  $\mu = 3000$  pax/hr a 5000 pax/hr, se produce por diferencias en la convergencia el algoritmo de Diseño Operacional, no obstante se halla dentro del grado de error del modelo y no invalida en forma alguna el comportamiento general de la función objetivo.

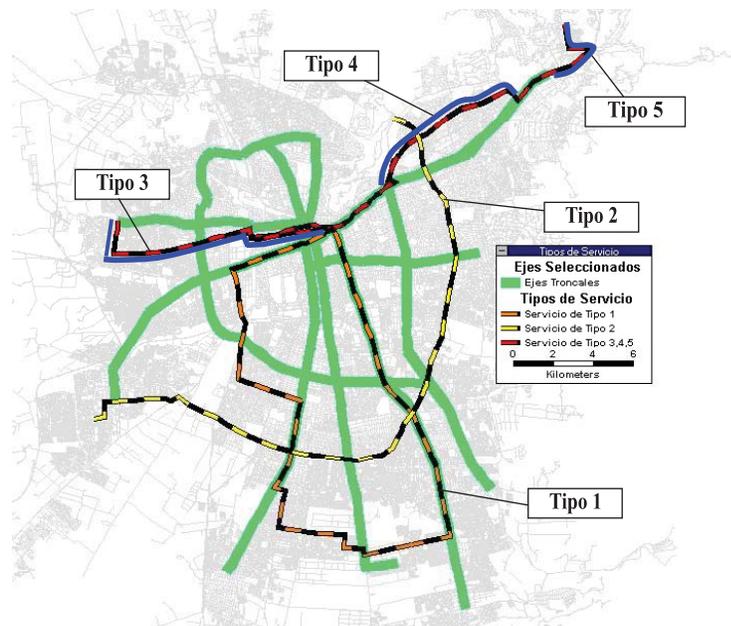
15 El resultado obtenido al utilizar  $\mu = 5000$  pas/hr, extraño intuitivamente, se explica porque a un bajo nivel de  $\mu$ , el sistema genera un exceso de servicios, conduciendo a una situación con un exceso de recorridos, similar a la descrita al principio de este artículo.

adicional. Se produce también una disminución en el costo de tiempo de viaje, ya que en este se considera la penalización de los transbordos.<sup>16</sup>

Dada la mayor cantidad de servicios directos que se generan a medida que el valor de *mu* disminuye, un número creciente de los recorridos monocorredor tienden a desaparecer, al obtener frecuencias óptimas muy bajas.

### 4.3. Pruebas Módulo DFAL

El módulo *DFAL* genera el conjunto candidato de recorridos alimentadores a partir del sistema de recorridos actual. En las figuras 5 y 6 se ejemplifican los recorridos obtenidos los que se pueden clasificar en seis tipos diferentes. El primero corresponde a aquellos recorridos cuyo trazado es un circuito, que pueden operar con un solo terminal en cualquier punto del trazado. Los de tipo 2 son aquellos servicios que atraviesan transversalmente algún(os) corredor(es) troncal(es)). Los recorridos de tipo 3 son aquellos que conectan con un corredor troncal en su punto de retorno. Los recorridos de tipo 4 son aquellos que en sus dos extremos (terminales) conectan con un corredor. Los recorridos tipo 5 corresponden a aquellos que continúan el trazado de un corredor troncal y por lo tanto conectan con este en uno de sus extremos; en este caso un extremo del recorrido alimentador conecta con un extremo del corredor. Por último, los recorridos tipo 6 corresponden a servicios de tipo 3, 4 ó 5, para los que, debido a alguna(s) singularidad(es) en la codificación del trazado no es posible generar un servicio de retorno.



**Figura 3: Ejemplos de Recorridos Generados con DFAL**

Utilizando la red estructural definida en la sección 4.1, se ejecutó el módulo *DFAL*. En la Tabla 3 se especifica el número de recorridos obtenidos. El tiempo de ejecución que se obtuvo para este módulo estuvo entre 3 y 5 minutos.

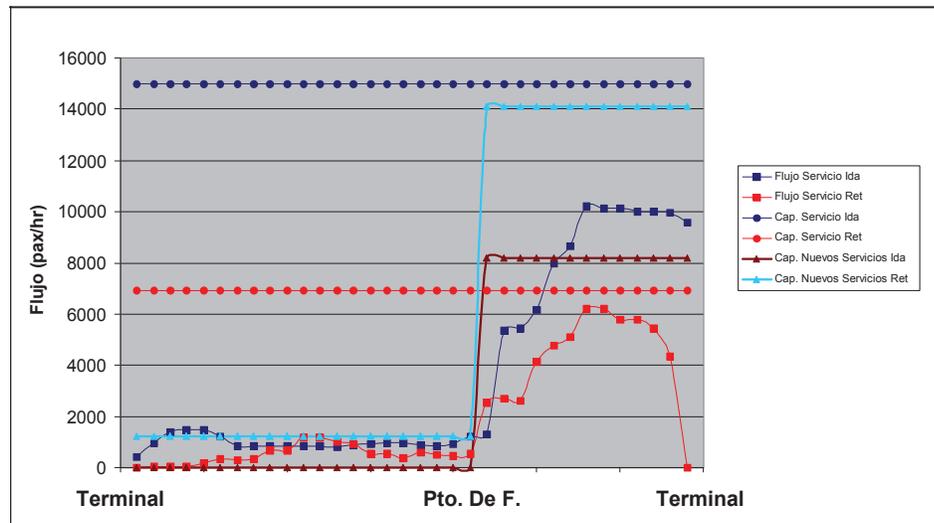
<sup>16</sup> Esta se incorpora a través del parámetro px\_fer del módulo artp3\_rc de ESTRAUSS.

**Tabla 3**  
**Recorridos Generados Ejecución Módulo DFAL**

Tipo	Breve Explicación	Servicios Generados
1	Recorridos cíclicos sin servicio de retorno.	5
2	Recorridos que nunca pasan por un corredor estructural.	174
3	Recorridos que parten desde el terminal inicial del servicio original.	504
4	Recorridos cuyo trazado es una fracción interna del servicio original.	152
5	Recorridos que parten desde el terminal final del servicio original.	510
6	Recorridos en que no se pudo generar servicio de retorno.	1

#### 4.4. Pruebas Módulos HFR y HE

Se efectuaron varias pruebas de los módulos *HFR* y *HE*. En dichas corridas, se decide eliminar una línea si ésta obtiene una frecuencia óptima inferior a 0.1 veh/hr. En una primera instancia, se ejecutó el módulo *HE* sobre la red generada con el módulo *DFES* utilizando  $\mu = 3000$  pax/hr. Dicho módulo eliminó 23 recorridos, dejando un sistema con 98 servicios en el sector estructural. Sobre la red resultante, se realizaron dos iteraciones de los módulos *HFR* – *HE*, uno a continuación del otro. La aplicación secuencial de ambas heurísticas permite acortar algunos recorridos y generar recorridos más cortos que refuercen los sectores de mayor demanda para aquellos recorridos con cargas heterogéneas. Partiendo de un sistema con 98 recorridos, 16 de ellos fueron eliminados. Por otro lado, se modificaron 64 recorridos generándose servicios complementarios que refuerzan sectores de alta carga. El tiempo de ejecución de este módulo fue de 6 horas, en promedio.



**Figura 4: Ejemplo de Aplicación de Heurística de Fraccionamiento**

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la aplicación de la heurística de fraccionamiento (módulo *HFR*). En ella se muestran las capacidades y flujos iniciales en el recorrido. Se observa que a partir del punto de fraccionamiento (Pto. de F.) la carga sobre los recorridos en ambos sentidos crece significativamente. La heurística de fraccionamiento aprovecha esto y genera un recorrido desde este punto hasta el terminal final (de la derecha). De esta manera, queda un recorrido sobre todo el trazado original y se genera otro sobre la fracción del trazado recién

descrita. Sumando estas capacidades se obtiene el nuevo nivel de capacidad, la que se encuentra mucho mejor adaptada a la demanda que el recorrido original. Una aplicación sucesiva de los módulos *HFR - HE* converge a un sistema de recorridos más eficiente y mejor adaptado que el sistema generado por el módulo *DFES*, el que a su vez debiera ser mejor que el sistema que funciona sólo con recorridos mono-corredor.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una metodología heurística para la resolución del problema de Diseño de un Sistema de Transporte Público Urbano. Las heurísticas propuestas, a diferencia de las existentes en la literatura, que resuelven el problema general, utilizan la información que puede obtenerse de la solución actual del sistema. Además, el conocimiento de la estructura de flujos sobre el sistema y sus características topológicas permiten reducir de manera importante el espacio de soluciones. Para los análisis realizados se utilizó un modelo microeconómico para la función de costo social total que considera todos los elementos relevantes, tanto para los operadores como para los usuarios.

Se ha propuesto un conjunto de heurísticas que permiten la aproximación al diseño óptimo de una ciudad. En este trabajo se ha explicado cada heurística y la metodología general de aplicación del conjunto de ellas.

Finalmente se mostró la aplicación de los algoritmos implementados sobre una red de tamaño real<sup>17</sup>. Los resultados son consistentes con lo esperado, y el tiempo de ejecución de los distintos programas permite obtener resultados computacionalmente razonables en un computador adecuado para éstos fines. Esto implica que la metodología propuesta puede ser aplicada a un caso real, generando una estructura eficiente para una ciudad de gran tamaño.

## AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este trabajo fueron obtenidos en un proyecto de investigación financiado por FONDECYT del gobierno de Chile y por la Pontificia Universidad Católica de Chile.

## REFERENCIAS

Baaj, M y H. Mahmassani (1995) Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm For The Design of Transit Networks, **Transportation Research C, Vol. 3, No. 1, pp 31-50.**

SECTRA (2003) **Análisis de Modernización de Transporte Público, V Etapa.** Estudio realizado por Fernández y De Cea Ingenieros Ltda y CIS Asociados.

---

<sup>17</sup> Se utilizó una red de transporte público de la ciudad de Santiago de Chile.

---

Ceder, A. y N. Wilson (1986) Bus Network Design, **Transportation Research B**, Vol. 20B, No.4, 331-344.

Jara S. y A. Gschwender (1999) Comparación de Estructuras de Líneas de Transporte Público Programado: ¿Directas o en Corredores?. **Actas IX Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago.461-475.**

Lee, Y. (1998) **Analysis and optimization of Transit Network Design with integrated routing and scheduling**, Presented to the Faculties of the University of Pennsylvania in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

Mohring, H. (1972) Optimization and Scale Economics in Urban Bus Transportation, **American Economic Review**, 62, 591-604

Newell, G.F. (1979) Some issues related to the optimal design of bus routes, **Transportation Science**, 13, 20-35.

Norambuena, I. (2002) **Diseño óptimo de sistemas de transporte público urbano**. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.