Caso Diseño Operativo de un Sistema de Transporte Público

Antonio Gschwender y Sergio R. Jara-Díaz
Universidad de Chile, Dpto. de Ingeniería Civil

Presentación del Caso para los Estudiantes

1. Introducción

Preocupados por las malas evaluaciones que el sistema de buses arrojaba en las encuestas, las autoridades de una ciudad de 6 millones de habitantes decidieron llevar a cabo profundos cambios en ese servicio. Los diagnósticos indicaban que algunas de las principales falencias eran la falta de coordinación entre los servicios (los trazados estaban diseñados para que las líneas compitieran entre ellas en vez de complementarse), la inexistencia de tarifas integradas lo que obligaba a los usuarios a pagar doble tarifa cuando se hacían transbordos, la alta variabilidad en los tiempos de viaje y espera, el alto número de choques y atropellos causados por una conducción agresiva, las malas condiciones de mantención de los vehículos y la congestión entre buses que se producía en paraderos de alta demanda. Muchas de estas deficiencias se debían a la estructura industrial del sector, la cual se caracterizaba por un enorme número de pequeños empresarios con un promedio de tan sólo dos buses por operador. Esto generaba fuertes incentivos sobre los empresarios para que compitieran unos con otros (incluso al interior de una misma línea), y ellos traspasaban esos incentivos al chofer para que compitiera en la calle tratando de maximizar el número de pasajeros que subía al bus que él conducía.

El organismo de planificación de transporte de la ciudad ideó un plan que buscaba cambiar drásticamente muchos aspectos del antiguo sistema. Se cambiaba la estructura de la industria, con pocas empresas operando cientos de buses cada una, se generaba una tarifa plana (idéntica para todos los viajes), que permitía realizar transbordos gratuitos, se cambiaba la estructura de los trazados generándose servicios complementarios no competitivos, los cuales se dividieron en servicios troncales que permitían atravesar toda la ciudad y servicios alimentadores que recorrían menores distancias acercando a las personas a las líneas troncales. Se trataba de incentivar el uso del transporte público para no aumentar el uso de los automóviles, el cual provoca una ineficiente utilización del espacio urbano.

Uno de los desafíos que enfrentó el plan fue el diseño de los servicios troncales, lo que implicaba definir en un primer nivel el trazado o conjunto de calles por las que circula cada una de las líneas, y en un segundo nivel la frecuencia (buses por hora) y tamaño de vehículo (capacidad de los buses) de cada línea. Anteriormente el diseño de los servicios había estado prácticamente por completo en manos de operadores privados. Éstos proponían cambios en los trazados cuando lo estimaban conveniente, los cuales casi siempre eran aceptados por la autoridad. Las frecuencias raramente eran

fiscalizadas, pero los operadores tenían incentivos económicos que los llevaban a ofrecer altas frecuencias a lo largo de todo el día. Sólo el tamaño de los vehículos había sido efectivamente regulado por la autoridad, tendiéndose a lo largo de los años a la utilización de vehículos más grandes con el objetivo de intentar reducir la congestión entre buses que se observaba en los paraderos de las vías más importantes de la ciudad. Así, la planificación de los servicios era un desafío completamente nuevo para la autoridad, en el cual existía escasa experiencia. No obstante, un adecuado diseño era clave para el buen funcionamiento del sistema.

2. Zonificación y periodización

La figura 1 muestra a la ciudad dividida en 6 zonas, además de una red simplificada formada por las principales calles que unen estas zonas. La tabla 1 indica la longitud de cada arco de la red. Las flechas verdes en la figura 1 (llamados “conectores”) indican, para fines de modelación, los puntos de origen y destino para los viajes de esa zona, es decir, los puntos en los cuales el modelador asume que se inician (o terminan) todos los viajes de la zona. En la zona centro se asume que cualquier nodo es válido como origen o destino de los viajes. En las zonas con dos conectores se asume que los viajes pueden iniciarse y terminarse en cualquiera de ellos. Los puntos relevantes de la red (nodos) están numerados del 1 al 23. Los nodos representan intersecciones y conectores.

A partir de encuestas específicas de origen-destino y mediciones en terreno se obtuvo información de la demanda por transporte en el modo bus. Los análisis de esta demanda permitieron establecer que la mayor concentración de viajes se producía en la hora punta de la mañana en los días laborales. Por lo tanto, se decidió utilizar este período como período de diseño, pues se asumió que en los restantes períodos se requeriría una cantidad menor o igual de buses. La tabla 2 muestra la matriz origen-destino de viajes por hora en bus en el período punta de la mañana obtenida a partir de las encuestas. La matriz considera las seis zonas indicadas en la figura 1. Para el diseño de los servicios troncales sólo interesan las celdas que no están en la diagonal de la matriz, pues se asume que los viajes internos en cada zona se realizarán usando los servicios locales o alimentadores.

Figura 1: Zonas y red vial

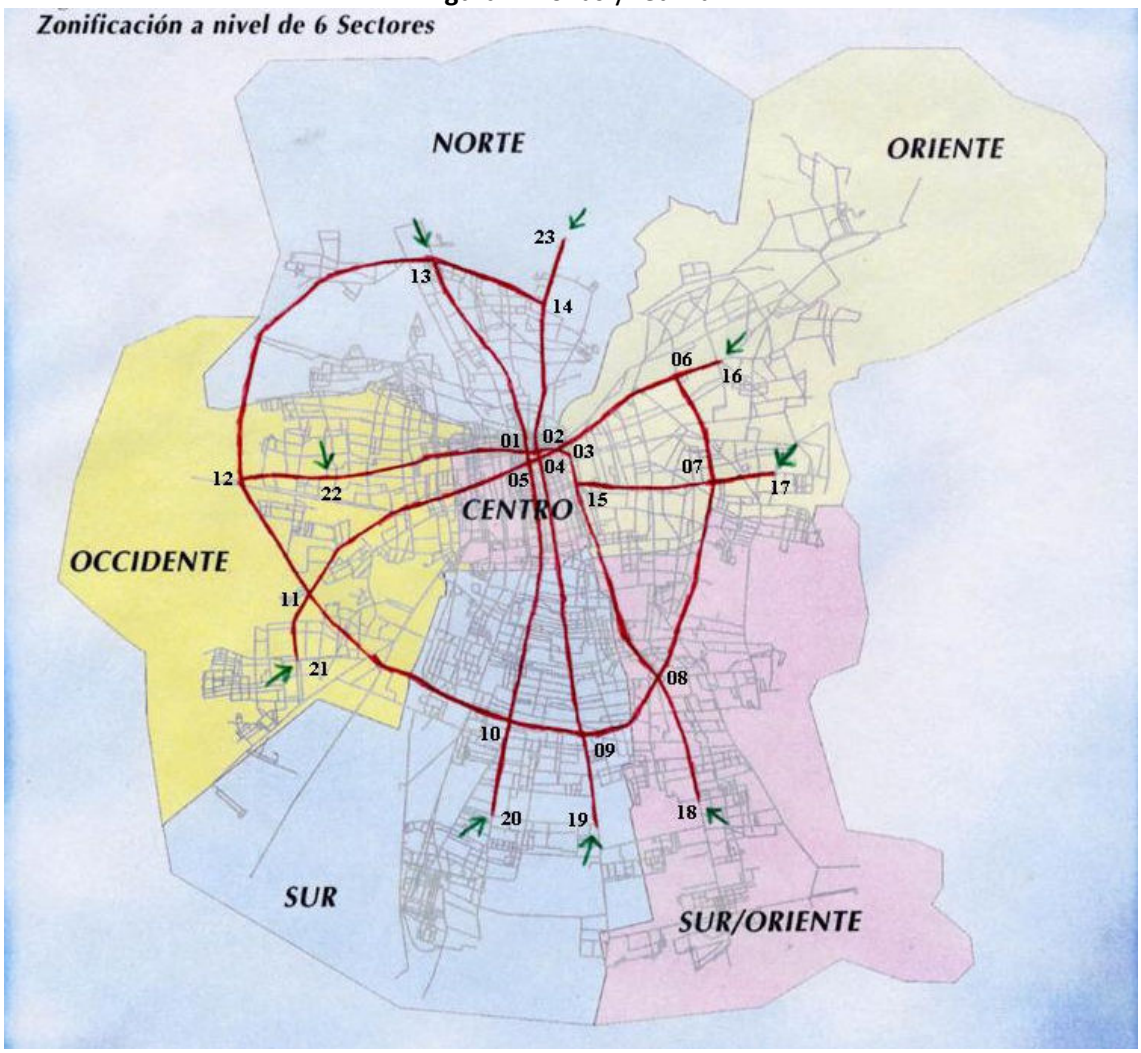

Tabla 1: Longitudes de arcos entre pares Origen-Destinos [m]

O/D	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	430			1000								8500									8000	
2		800	750										5500									
3			1100		5300									2000								
4				500				11300														
5									10500	11000												
6						5000									1800							
7							8000							5700		2500						
8								4700						9000			3500					
9									2900									3700				
10										10300									3800			
11											6000									2600		
12												14300									3600	
13													4800									
14																						2700

Tabla 2: Matriz Origen-Destino. Viajes por hora en punta mañana, modo bus

Origen	Destino (viajes/hr)	1 Norte	2 Occidente	3 Oriente	4 Centro	5 Sur	6 Suroriente	Total
1	Norte	42.537	5.859	8.237	25.464	6.015	1.679	89.791
2	Occidente	9.322	41.233	17.212	36.101	11.039	1.976	116.882
3	Oriente	5.137	7.874	50.328	21.613	6.859	4.970	96.781
4	Centro	9.292	5.229	11.437	13.874	4.572	1.841	46.246
5	Sur	13.009	11.357	14.251	34.159	56.132	16.694	145.603
6	Suroriente	6.864	7.853	26.111	27.560	19.072	29.448	116.908
	Total	86.161	79.405	127.576	158.772	103.689	56.608	612.211

3. Los buses y su circulación

Tras analizar la oferta de los principales fabricantes de buses del mundo, se concluyó que básicamente había cuatro tipos de buses disponibles, cuyas características de capacidad, precio y costo de operación se indican en la tabla 3.

Tabla 3: Características de los buses

Bus	Capacidad [pax]	Valor US$	Costo por veh-km US$/veh-km
Biarticulado	190	290.000	1,15
Articulado	150	180.000	0,72
Mediano	80	120.000	0,47
Pequeño	50	80.000	0,31

Figura 2: Tipos de buses

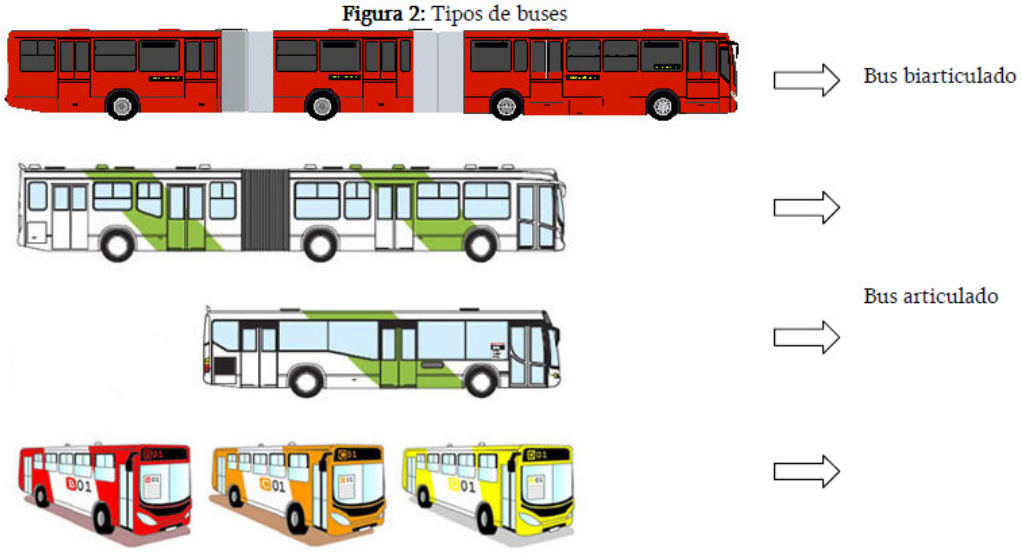

Figura 3: Bus articulado

El diseño del sistema enfrentaba una restricción financiera, la cual provenía de dos decisiones de las autoridades políticas. Por una parte, se definió una tarifa máxima a pagar, considerando las condiciones socio-económicas de los usuarios. Por otra parte, se limitó el apoyo financiero (subsidio) para la operación del sistema.

Al diseñar con información de demanda correspondiente al período punta mañana, surge el problema de cómo expandir los resultados al resto de los períodos. En particular, para verificar el cumplimiento de las restricciones financieras, se requiere estimar la cantidad de vehículos-kilómetro (veh-km) que circularán a lo largo de todo el año. En efecto, con los datos disponibles es posible estimar, para un diseño dado, la cantidad de veh-km que circularán en una hora del período punta mañana, pero no los correspondientes al año completo. A partir de análisis de cómo varían las frecuencias en los diferentes períodos (fuera de punta, nocturno, fin de semana, verano, etc.) fue posible estimar un factor de expansión específico para este fin, el cual arrojó que en un

año circularían aproximadamente 2.000 veces la cantidad de veh-km que circulan en una hora punta mañana.

La velocidad comercial a la que circulan los buses depende de la cantidad de detenciones tanto en semáforos como en paraderos, de la duración de estas detenciones y de las condiciones de congestión de la vía. Este último factor es especialmente importante si los buses deben compartir las pistas con los autos. Si bien las condiciones de circulación varían de arco en arco, se asumió que la velocidad comercial sería de 20 km/hr en promedio.

Cada arco de la red que se muestra en la figura 1 representa varias calles paralelas. Esto permite trabajar con una red más simple que si se consideraran todas las calles por las que realmente circularán buses. Sin embargo, la capacidad de estos arcos sintéticos debe considerar la cantidad total de pistas por sentido, sumando sobre todas las calles relevantes representadas por cada uno de ellos. Esta información se entrega en la tabla 5. Tomando en cuenta restricciones de circulación y capacidad de los paraderos, se ha considerado que cada pista puede soportar un máximo de 70 buses por hora, sin importar su tamaño. Será necesario considerar esta restricción de capacidad de las vías en el diseño de los trazados y frecuencias.

Tabla 5: Pistas por Arco. Número de pistas por sentido en cada arco

O/D	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	7			5								8									7	
2		5	4										4									
3			7		10									7								
4				7				4														
5									7	8												
6						9									9							
7							5							7		7						
8								7						5			7					
9									7									4				
10										5									7			
11											4									6		
12												3									7	
13													4									
14																						3

4. Costo generalizado

En un sistema integrado en el cual es posible realizar transbordos gratuitos, los usuarios generalmente tendrán diferentes alternativas para realizar su viaje. Por ejemplo, una alternativa puede ser tomar un servicio que los lleva directamente desde el origen al destino, mientras que una segunda opción puede ser utilizar dos servicios realizando un transbordo entre ellos. Es sabido que las personas tratan de evitar los transbordos (incluso cuando son gratuitos), pues estos implican una interrupción del viaje y agregan incertidumbre al desplazamiento, dado que en el transbordo hay que esperar nuevamente la llegada de un bus. La aversión a transbordar será mayor en la medida en que las frecuencias de los servicios sean menores – debido al mayor tiempo medio de espera – y que los intervalos entre vehículos de una línea sean más disparejos, pues causan mayor incertidumbre en la espera. No obstante, si por ejemplo la frecuencia del servicio directo es mucho más baja que la de los servicios con

transbordo, los usuarios podrían preferir la segunda alternativa. Por otra parte, para los casos en que no existe un servicio directo, los usuarios tendrán que optar entre las diversas alternativas con transbordo que el sistema ofrezca.

Al planificar el sistema, el modelador enfrenta el problema de cómo predecir las decisiones que tomarán los usuarios. En este caso es particularmente relevante la predicción de las decisiones de ruta que adoptarán los usuarios, dado un diseño de servicios. Es sabido que variables como tarifa, tiempo de espera, tiempo de viaje al interior del vehículo y tiempo de caminata son variables relevantes para modelar las elecciones de ruta de los usuarios. Es más, modelaciones anteriores han revelado que las personas valoran de diferente forma cada uno de los tiempos recién mencionados. En efecto, a partir de información de modelos de demanda se pudo determinar que el tiempo de viaje al interior del vehículo era valorado en 600 pesos por hora, el tiempo de espera en 1.800 pesos por hora y el tiempo de caminata en 3.000 pesos por hora. A la suma ponderada de todas estas variables más la tarifa se le llama "costo generalizado de viaje".

Por otra parte, se ha estimado que los transbordos entre líneas de buses implicarían en promedio un tiempo de caminata de 2 minutos, aparte del tiempo de espera adicional.

Si los buses circulan a intervalos regulares, el tiempo de espera promedio para una línea puede asumirse como la mitad del intervalo, es decir, $t_e = 0{,}5 / f$, donde f es la frecuencia de la línea (la frecuencia es el inverso del intervalo entre vehículos). En algunos casos un usuario puede utilizar más de una línea, si varias coinciden (parcialmente) en su trazado. En estos casos es razonable suponer que el pasajero tomará el primer bus que pase de cualquiera de las líneas que le sirven ("líneas comunes"). Su tiempo de espera estará dado por la expresión anterior, pero considerando la frecuencia agregada, es decir, la suma de las frecuencias de todas las líneas que le sirven.

Debe tenerse en consideración que cada arco modelado representa varias calles reales, por lo que la frecuencia de una línea de buses modelada deberá distribuirse entre varias calles reales. Por esto, los pasajeros observarán en la realidad una frecuencia menor que la modelada, y esto debe verse reflejado en la determinación de los tiempos de espera.

5. Asignación de pasajeros

Dado un conjunto de líneas para el cual se haya definido sus trazados, es posible determinar, para cada par origen-destino de la matriz de viajes, todas las opciones de viaje o **rutas**. El modelador debe definir algún criterio que le permita seleccionar qué rutas serán consideradas dentro del conjunto de alternativas y cuáles serán descartadas en cada par O-D. Rutas que impliquen muchos transbordos y caminos demasiado rebuscados pueden ser desechadas a priori, siempre que existan otras alternativas mejores. Se debe optar entre tener demasiadas rutas que analizar en detalle, lo cual aumenta la dificultad de los cálculos, o desechar rutas que tal vez

pudiesen ser utilizadas, lo cual disminuye la calidad de la predicción. En cualquier caso, se debe tener en cuenta que las rutas aceptables deben ser aquéllas que los usuarios realmente preferirían.

Para cada una de las rutas aceptables para un par origen-destino, se puede calcular el costo generalizado correspondiente. Éste es función, entre otras cosas, de las frecuencias de las líneas. El siguiente problema que el modelador debe enfrentar es cómo decidir qué rutas elegirán los usuarios de ese par origen-destino. En efecto, un criterio muy sencillo es asignar a todos los usuarios a la ruta de menor costo generalizado. Este será un buen criterio si el costo generalizado de esa ruta es mucho menor que el de la siguiente alternativa. Pero si existen otras rutas con costo generalizado parecido, el criterio parece alejarse del comportamiento real que tendrán los pasajeros. En el caso extremo en que dos rutas tengan exactamente el mismo costo generalizado (mucho menor que todas las demás alternativas), asignar la mitad de los usuarios a cada una de las rutas parece la alternativa más adecuada. El modelador debe definir un criterio que satisfaga todas las posibles situaciones.

Cuando una cierta cantidad de usuarios hayan sido asignados a dos o más "líneas comunes", deben repartirse entre esas líneas de forma proporcional a sus respectivas frecuencias.

6. Determinación de frecuencias

La asignación de todos los pasajeros a las respectivas mejores rutas implica la asignación de los usuarios a tramos de líneas. Con esta información se puede calcular la carga de pasajeros que cada línea tendrá en cada tramo o arco. Esto permite determinar la carga máxima de cada línea, es decir, la cantidad de pasajeros por hora que la línea deberá transportar en el tramo más cargado. A esta carga máxima se le suele llamar "carga de diseño", pues representa la cantidad mínima de pasajeros que la línea debe ser capaz de transportar, combinando frecuencia y tamaño de bus para proveer capacidad suficiente.

Las frecuencias necesarias para satisfacer la demanda pueden no ser consistentes con aquellas usadas en el cálculo del costo generalizado. Por lo general será entonces necesario realizar un proceso iterativo en el cual se vuelve a calcular los costos generalizados, se vuelve a asignar a los usuarios y se vuelve a determinar frecuencias hasta alcanzar consistencia en todas ellas.

7. Optimización del sistema

El sistema diseñado debe satisfacer las restricciones existentes, tanto de presupuesto como de capacidad de las vías. Pero el objetivo del diseño es lograr el mejor sistema posible para los usuarios. Es necesario por lo tanto definir un indicador que dé cuenta de la calidad del diseño. Algunas de las variables que típicamente son de interés social para incluir en tal indicador son el tiempo gastado por los usuarios, los costos de

inversión y operación y las externalidades como emisiones (gases y ruidos), accidentes (colisiones y atropellos) y reducción en el uso del auto.

Una vez definido el indicador de calidad, es posible optimizarlo realizando cambios en el diseño de los servicios, tanto a nivel de trazados, como de frecuencias y tamaños de los vehículos.

NOTA: Para una ciudad de 6 millones de habitantes, este problema se enfrenta en tamaño real modelando la ciudad dividida en cientos de zonas y con miles de arcos.