

## Estudio de Caso de Transporte Público

### Objetivos del Estudio

En base al texto “*Caso Transporte Público*”, los objetivos que se deben cumplir al finalizar es estudio son los siguientes:

- Comprender los conceptos asociados a la modelación de una red de transporte público: zonificación, redes de transporte (arcos, nodos, conectores), matrices origen-destino y análisis por períodos.
- Realizar una modelación de la red presentada, determinando las frecuencias en las líneas de transporte público, la carga de diseño y la capacidad de una línea de buses, de acuerdo a las restricciones que presenta el proyecto.

### Comportamiento de los Usuarios

Para realizar la modelación del problema presentado, es importante comprender el comportamiento de los usuarios. De acuerdo al texto, se entenderá que los usuarios del sistema del transporte son seres racionales que buscan minimizar el costo que conlleva la realización del viaje, al cual llamaremos costo generalizado de los usuarios  $CG$  :

$$CG = P + \theta_e t_e + \theta_v t_v + \theta_a t_a \quad (1)$$

donde,  $P$ : tarifa del viaje, integrada y plana

$t_e, t_v, t_a$ : tiempo de espera, viaje y acceso, respectivamente

$\theta_e, \theta_v, \theta_a$ : parámetros de la función de costo generalizado

Para el cálculo del tiempo medio de espera (en el origen y en cada trasbordo)  $t_e$ , se debe considerar que el intervalo promedio entre un bus y otro es  $1/f$ , donde  $f$  es la frecuencia de los buses [buses/hora]. Bajo condiciones ideales, las personas esperarán en promedio la mitad de este intervalo. Esto  $1/2f$  se multiplica por un factor 3 (arbitrario) para tomar en consideración que cada arco del modelo representa varias calles en la realidad. De esta forma:

$$t_e = \frac{3}{2f} \quad (2)$$

El tiempo de viaje  $t_v$  al interior del vehículo que se calcula a partir de la longitud de los arcos y la velocidad comercial de los buses.

Dado el problema que se está resolviendo, se puede asumir que tiempo de acceso o caminata al inicio y final del viaje es independiente del diseño de líneas. Por lo tanto, es irrelevante para la comparación de rutas alternativas. En caso de trasbordos aparece un tiempo de caminata relevante, el que se puede considerar como 2 minutos por cada trasbordo.

## Restricciones del Problema

Para que la modelación del sistema de transporte público sea realista, se han incluido una serie de restricciones que deberán ser respetadas en la resolución del caso.

1. *Restricción presupuestaria*: los operadores del sistema tiene disponible un monto de dinero fijo para el diseño del sistema, por lo cual la inversión en compra de vehículos y operación de los mismos no puede superar los valores de la tabla 4.
2. *Satisfacción de la demanda*: el sistema de transporte diseñado debe ser capaz de cubrir la demanda de viajes estimada en la tabla 2 para cada par origen-destino.
3. *Capacidad de los buses*: se debe respetar la capacidad de los cuatro tipos de buses disponibles en la tabla 3.
4. *Capacidad de las vías*: En cada arco de la red debe cumplirse la restricción de capacidad de las vías: por cada pista puede circular un máximo de 70 buses por hora (independiente del tamaño de los buses).

## Resolución del Problema

Los pasos a seguir para el diseño del sistema de transporte de la ciudad son los siguientes:

1. Diseño físico de las líneas: a partir del análisis de la matriz de viajes trazar líneas de buses que parezcan razonables, cubriendo todos los puntos de ingreso y egreso a la red definidos en la figura.
2. Definir un tamaño de bus y una frecuencia (buses/hr) inicial para cada línea diseñada: estos valores asignados a priori deben cumplir con las restricciones explicadas en el punto anterior.

Luego, la cantidad máxima de personas que puede cruzar una sección de la línea en un sentido por unidad de tiempo  $Q$  queda dada por:

$$Q_l = f_l \cdot k_l \quad (3)$$

donde:  $f_l$ : frecuencia de la línea l [bus/hr]

$k_l$ : capacidad de los vehículos de la línea l [pax/bus]

3. Para cada par origen - destino se deben determinar todas las rutas disponibles: dentro de estas rutas sólo se deben considerar aquellas que sean “atractivas”, es decir, no se deben incluir aquellas rutas que signifiquen un costo excesivo para los usuarios.

Por simplicidad, considerar que los nodos de destino no deben ser necesariamente los conectores de las zonas, y que las personas pueden transbordar entre los nodos 1, 2, 3, 4 y 5 (en el centro) directamente caminando.

4. Determinar el costo generalizado CG de las rutas, para todos los pares origen-destino.

Para el cálculo del tiempo de espera, si existe en una parte de una ruta dos o más líneas que cubren los mismos arcos, los usuarios en la práctica no decidirán a priori una de ellas, sino que utilizarán la primera que pase. De esta forma, para la

asignación debe considerarse que ellas forman una “línea común” cuya frecuencia es la suma de las frecuencias de todas ellas:

$$f = \sum_i f_i \quad (4)$$

5. Asignar la matriz de viajes a las líneas diseñadas: el criterio más simple es asignar a todos los pasajeros a la ruta con el menor costo generalizado (“ruta mínima”). Sin embargo, si dos rutas tienen costos muy parecidos, este criterio no será adecuado. En este caso se asignará proporcionalmente al inverso del CG de cada ruta, considerando todas las rutas cuyo CG es a lo más 1,5 veces el CG de la ruta mínima. La proporción correspondiente a cada ruta  $r$  quedaría dada por la expresión:

$$P_r = \frac{1/CG_r}{\sum_s 1/CG_s} \quad \forall r \text{ tq } CG_r \leq \frac{3}{2} CG_{r^*} \quad (5)$$

donde  $CG_{r^*}$  corresponde al costo generalizado de la ruta mínima.

La asignación de pasajeros a cada una de las líneas de la “línea común” se debe hacer proporcional a la frecuencia de cada una. Es decir, la proporción de usuarios que utilizará la línea  $j$  queda dada por la expresión:

$$P_j = \frac{f_j}{\sum_i f_i} \quad (6)$$

6. Determinar frecuencia y tamaño de los vehículos para cada línea de buses, a partir de los flujos de pasajeros asignados: llamaremos carga de diseño  $\lambda_l$  al número de pasajeros que utiliza el tramo más cargado de la línea  $l$ , es decir la carga máxima de la línea. Luego, para cada línea se puede determinar una frecuencia y un tamaño de vehículos que permitan transportar a todos los usuarios de esa línea. Para esto la capacidad resultante  $Q_l$  tiene que ser mayor o igual a la carga de diseño:

$$Q_l = f_l \cdot k_l > \lambda_l \quad (7)$$

Manteniendo la capacidad de los vehículos fija se puede calcular la frecuencia necesaria para satisfacer la carga máxima de cada línea. Las frecuencias que se obtienen aquí (para satisfacer las cargas de diseño) deben ser consistentes con las frecuencias que se utilizaron para asignar a los pasajeros.

Si las frecuencias calculadas mediante la fórmula (7) son distintas a las iniciales, se debe volver al punto 4., e iterar hasta que éstas converjan. En caso que esto no ocurra, o bien se violen las restricciones del problema, se debe volver al punto 1. y rediseñar la estructura de líneas.

## Cálculo de los Costos del Sistema

1. Costos de inversión en vehículos: la flota necesaria para cada línea  $B_l$  se calcula de acuerdo a:

$$B_l = f_l \cdot t_{c_l} \quad (8)$$

donde  $t_c$  es el tiempo de ciclo, es decir, el tiempo que el bus requiere para realizar una vuelta completa (ida y vuelta).

Debe considerarse una flota de reserva, pues en la práctica no es posible contar con el 100% de la flota para operar todos los días. En efecto, siempre habrá algunos vehículos con desperfectos, daños, en reparaciones o en mantención preventiva que no estarán disponibles. Por esto, debe considerarse un 10% adicional de flota al calcular el costo de inversión.

2. Costo de operación de las líneas: el costo de operación por hora se calcula multiplicando el costo por vehículo-kilómetro  $c$ , el número de buses  $C$  y la velocidad comercial  $v$ . Cabe hacer notar que el producto  $B \cdot v$  indica cuántos vehículos-kilómetro se recorren en una hora.

Este valor se debe amplificar por un factor  $\Psi$  que permite pasar del costo por hora al costo por año.  $\Psi$  tiene unidades de horas por año. Como el cálculo de flota se hace a partir de la información de la matriz origen-destino para el período punta mañana (viajes por hora), el factor  $\Psi$  representa cuántas veces se repite en el año la hora punta mañana en términos de vehículos-kilómetro recorridos. Es por lo tanto un factor de expansión que toma en cuenta no sólo cuántas horas reales hay en el año, sino que también considera que en algunas horas (por ejemplo fuera de punta o noche) circulan menos buses que en el período punta. El costo de operación anual de cada línea es entonces:

$$C_{op_l} = \Psi \cdot B_l \cdot v \cdot c \quad (9)$$

Considere  $\Psi = 2000$  [hrs / año]

## Calidad del Servicio

Para medir la calidad del sistema diseñado se puede definir un índice de calidad del servicio (ICS) que considera el total de tiempo gastado por las personas, valorado según las percepciones subjetivas de cada componente del tiempo. El ICS se obtiene sumando sobre todos los viajes (suma ponderada sobre los pares origen-destino):

$$ICS = \sum \theta_e \cdot t_e + \sum \theta_v \cdot t_v + \sum \theta_a \cdot t_a \quad (10)$$

Si se divide el ICS por el número total de viajes se obtiene un ICS promedio por persona.

### **Evaluación del Caso**

La evaluación de este trabajo consistirá en:

- Entregas semanales: se considerarán como notas de talleres.
- Un informe que explique lo realizado y los resultados obtenidos en el caso: la nota de este informe corresponderá a una pregunta de la nota del control 3.

### **Fechas de Entregas Semanales:**

- Miércoles 31 de Octubre: diseño de líneas inicial y cálculo de costos generalizados iniciales.
- Miércoles 7 de Noviembre: asignación de pasajeros a la red

**Fecha de entrega del informe:** Viernes 17 de Noviembre, 16:30 hrs, secretaría de transporte (5to piso de Ingeniería Civil).