

M O S A R T P

UN MODELO DE ANALISIS DE REDES DE TRANSPORTE PUBLICO
PARA SANTIAGO

Juan Pablo Bunster R.
Consorcio Sigdo Koppers - Cis Ingenieros Consultores
Marchant Pereira 1055 - Santiago

Joaquín de Cea Ch.
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Departamento de Ingeniería de Transporte
Casilla 6177 - Santiago

RESUMEN

En este trabajo se presenta una breve descripción de los aspectos más importante de MOSARTP, un modelo de análisis de redes de transporte público desarrollado en el marco del Proyecto ESTUDIOS DE EVALUACION Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO (ESTRAUS).

Se presenta la estructura general del modelo y se describen brevemente los módulos relacionados con la asignación de viajes y estimación de matrices origen-destino. Finalmente, se analiza en mayor detalle una serie de aspectos específicos del modelo desarrollado.

1. INTRODUCCION

La importancia de los modelos de análisis de redes en la planificación de sistemas de transporte urbano es indiscutible. En efecto, los modelos de asignación de viajes (que representan sólo una parte de la función de análisis de redes) constituyen una valiosa herramienta de apoyo a la evaluación de proyectos estructurales y planes estratégicos.

No debe parecer extraño, entonces, que como una de las tareas importantes del "Estudio de Evaluación y Desarrollo del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Santiago" (ESTRAUS), encargado para su realización al consorcio de empresas Siglo Koppers y Cia Ingenieros Consultores por la Secretaría Ejecutiva de la Comisión de Transporte Urbano (SECTU), se consultara la implementación de un modelo de análisis de redes de transporte público, que contara con las características necesarias para tratar redes como la de nuestra ciudad y que respondiera adecuadamente a los requerimientos del proceso de planificación continua que se deseaba implementar.

En primer lugar, dada la relevancia que el problema de líneas comunes tiene en nuestro caso (Ver Bunster 1986), el modelo debía permitir su adecuado tratamiento. En segundo término, dada la incidencia del problema de agregación espacial en la calidad de los resultados de la asignación de viajes (Ver De Cea, 1982), el modelo debía ser capaz de asignar viajes a rutas múltiples entre zonas (Ver De Cea y Chapleau, 1984). Además, por tratarse de una herramienta de apoyo a un proceso de planificación que pretende ir actualizando constantemente la demanda de viajes entre zonas, a partir de información recolectada sobre la red, el modelo en cuestión debía tener la capacidad de ser fácilmente integrado a un modelo de estimación de matrices de viajes en transporte público.

El trabajo desarrollado en el marco del proyecto ESTRAUS en orden a satisfacer los requerimientos antes señalados ha dado origen al modelo MOSARTP. Su modelo de asignación está inspirado en la versión del modelo MADITUC disponible en el Departamento de Ingeniería de Transporte de la Universidad Católica de Chile (Ver Chapleau et al, 1982; De Cea y Chapleau, 1984; De Cea y Bunster, 1985 y Bunster 1986), en tanto su modelo de estimación de matrices es el implementado en el modelo ESMATUC, que ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería de Transporte de la Universidad Católica de Chile (Ver De Cea y Cruz, 1986). Las capacidades gráficas del modelo, de las que sólo se hará mención en este trabajo, están aún en etapa de desarrollo.

El objetivo de este trabajo es presentar una breve descripción de MOSARTP. La sección 2 describe la estructura general del modelo. En la sección 3 se indica la forma en que debe ser codificada la red de transporte público. La sección 4 está dedicada a la descripción de los aspectos particulares del modelo, que lo diferencian de MADITUC. Entre los principales cabe destacar:

- a) Carga de la red usando el algoritmo "S" de Chiriquí (Chiriquí, 1974).
- b) Modificaciones al algoritmo de cálculo de rutas mínimas.
- c) Uso de arcos de transbordo en la representación de la red de Metro.
- d) Cálculo de rutas combinadas mínimas: Metro-Bus y Bus-Metro.
- e) Estimación de matrices de viajes en transporte público.

Finalmente, en la sección 5 se presentan algunas consideraciones respecto a desarrollos futuros del modelo.

2. ESTRUCTURA GENERAL DEL MODELO

MOSARTP es un modelo de análisis de redes de transporte público de tipo determinístico, capaz de analizar redes de gran tamaño. En su versión actual el modelo es capaz de tratar una red de 500 zonas, 1500 nodos, 5000 arcos y 800 líneas.

El programa está escrito en FORTRAN 77 y tiene incorporada avanzadas técnicas de estructura de datos y manejo virtual de archivos. Contempla el uso de algunas herramientas que ofrece el sistema VAX/VMS de DIGITAL, sin que esto le resta flexibilidad para ser trasladado a otro tipo de equipo o configuración.

El modelo está compuesto por cinco módulos principales, que desarrollan tareas independientes pero complementarias entre sí. Ellos son:

- MTP1 : Construcción de la red de Transporte Público (representación interna).
- MTP2 : Solución al problema de acceso
- MTP3 : Cálculo de rutas mínimas
- MTP4 : Asignación de viajes a la red de transporte público y cálculo de parámetros básicos para estimación de matrices.
- MTP5 : Informes de la red de transporte público cargada.
- EMTP : Estimación de matrices de viajes a partir de matriz a priori y de conteos en arcos, líneas y arco-líneas.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de ellos, atendiendo especialmente a sus funciones básicas y a la forma en que se relacionan unos con otros (FIGURA 1).

PROGRAMA MTP1

Este programa lee los datos requeridos para describir la red, verifica su compatibilidad y genera la representación interna en un archivo no-formateado de rápido acceso.

La red transporte público queda representada por:

- Descripción de las líneas (secuencia de nodos)
- Características y tarifas de las líneas
- Arcos de superficie
- Arcos de metro
- Arcos de transbordo (o caminata sobre la red)
- Arcos de acceso
- Factores para calcular tiempo de viaje en arcos de superficie, según tipo de línea y clase del arco.

La información que debe ser codificada para describir la red, puede ser clasificada en dos grupos: aquella que tiene relación con las líneas del sistema y aquella que tiene relación con los arcos.

Las líneas de transporte público, ya sean de superficie o de metro, quedan representadas básicamente mediante la descripción de sus recorridos sobre la red. Esta descripción debe ajustarse al conjunto de arcos que ha definido el analista en su representación idealizada de la red. Adicionalmente, es necesario especificar el modo, la tarifa, la capacidad y el intervalo entre vehículos que presenta cada línea en particular.

Por su parte, los arcos de la red, ya sean de superficie, de metro, de transbordo o de acceso, quedan representados básicamente por el nodo de origen, el nodo de destino y el tiempo de viaje. Los arcos de superficie pueden ser clasificados a su vez en diferentes categorías, dependiendo de sus condiciones de operación, ubicación dentro de la red, etc.

Dentro de la información sobre los arcos de la red, se incluyen los factores para calcular el tiempo de viaje sobre los arcos de superficie. MOSARTP establece que el tiempo que demora una línea cualquiera en recorrer un arco dado, depende del modo de la línea y de la clase del arco de que se trate. Por ello, el analista debe especificar una "matriz de ponderadores clase/modo" para calcular el tiempo de viaje sobre los arcos de la red, en base al tiempo de equilibrio, obtenido de una asignación multimodal (Transporte Público - Transporte Privado), de cada uno de ellos.

A partir de la información que entrega el analista, MTP1 genera la representación interna de la red en estudio.

La estructura de representación interna de líneas que presenta MOSARTP está basada en la que tiene incorporada el modelo MADITUC. La información es almacenada internamente en base a listas ligadas que aseguran un aprovechamiento eficiente del espacio de memoria disponible y una gran velocidad de respuesta en la aplicación de los algoritmos de cálculo de rutas mínimas.

La estructura de representación interna usada en el caso de los arcos es bastante más sencilla. Mediante el uso de listas ligadas se logra un aprovechamiento óptimo del espacio de memoria y a la vez, se facilita la búsqueda de cualquier arco que se requiera identificar.

Finalmente, toda la información sobre la red (representación interna de líneas y arcos), es escrita sobre un archivo no-formateado que es leído posteriormente por los programas MTP2, MTP3, MTP4 y MTP5.

PROGRAMA MTP2

MTP2 se encarga de establecer y estructurar computacionalmente la solución al problema de acceso.

A partir de los elementos no nulos de la matriz de viajes entre zonas (Zo - Zd - Flujo) y de la información sobre los arcos de acceso, el programa genera el conjunto de itinerarios preliminares (IP) asociado a la red en estudio.

Para cada elemento Zo - Zd - Flujo se generan tantos IP como combinaciones de nodos de acceso en el origen y nodos de acceso en el destino existan. Un IP queda definido por:

- | | |
|--|---------|
| - Zona origen | (Zo) |
| - Zona destino | (Zd) |
| - Nodo origen | (No) |
| - Nodo destino | (Nd) |
| - Tiempo de acceso en el origen | (Tacor) |
| - Tiempo de acceso en el destino | (Tacde) |
| - Nro del elemento Zo-Zd-Flujo
asociado | (Ipere) |

El número de IP depende directamente del número de elementos no nulos de la matriz de viajes entre zonas y del número promedio de nodos de acceso por zonas.

PROGRAMA MTP3

MTP3 se encarga del cálculo de rutas mínimas sobre la red. El programa tiene incorporado cuatro algoritmos de cálculo de rutas que contemplan diferentes hipótesis sobre el comportamiento de los individuos. Ellos son:

- S/R O NODO (1) : Calcula el árbol de rutas mínimas a partir de un nodo de superficie dado, sin considerar líneas comunes.
- S/R O ZONA (1) : Calcula el árbol de rutas mínimas a partir de una zona (centroide correspondiente), sin considerar líneas comunes.
- S/R O COMBINADO MB : Calcula el árbol de "rutas combinadas mínimas del tipo Metro-Bus" a partir de un nodo de superficie dado, sin considerar líneas comunes. Este algoritmo está basado en S/R O nodo. La ruta combinada Metro-Bus contempla el uso de 1 o más líneas de Metro seguido por 1 o más líneas de superficie.
- S/R O COMBINADO BM : Calcula el árbol de "rutas combinadas mínimas del tipo Bus-Metro" hacia un nodo de superficie dado, sin considerar líneas comunes. Está basado en un algoritmo del tipo "S/R O invertido". La ruta combinada Bus-Metro contempla el uso de 1 o más líneas de superficie seguido por 1 o más líneas de Metro.

Con la ayuda de estos algoritmos es posible establecer diferentes modalidades de asignación de viajes sobre la red. MOSARTP es capaz de realizar una asignación del tipo "todo o nada" entre centroides, o bien, una asignación a "multi-rutas" entre nodos de la red. Por otro lado, independiente del tipo de asignación que se desee, el modelo permite optar por cálculo de "rutas mínimas" sin consideraciones sobre el tipo de líneas usadas, o por el cálculo de "rutas combinadas mínimas" donde se establecen rutas del tipo Metro-Bus y Bus-Metro exclusivamente. Esta última opción es de especial importancia en la calibración de modelos de demanda.

En esta etapa del proceso de asignación, el modelo ignora "intencionalmente" la presencia de líneas comunes sobre la red (ver sección 4.a). Las rutas mínimas que entrega MTP3 servirán de "base" para establecer las rutas que serán definitivamente cargadas. A esta altura del proceso, sólo interesa rescatar la configuración que ellas presentan, en términos de las secciones definidas (nodo inicial y nodo final de cada sección y tipos de líneas usadas).

(1) : Se desarrollarán algoritmos del tipo S/R X (Nodo y Zona) que consideran X líneas comunes en el cálculo de rutas mínimas.

Cuando se trata de una asignación a "multi-rutas", el programa procesa secuencialmente el archivo con itinerarios preliminares (previamente ordenados por nodo origen) y genera para cada uno de ellos un itinerario simulado base (ISB), el cual contiene la información relevante sobre la ruta mínima establecida en cada caso. Un ISB queda definido por:

- Zona origen (Zo)
- Zona destino (Zd)
- Nodo origen (No)
- Nodo destino (Nd)
- Nodos de transbordo de la ruta mínima
- Líneas características de cada sección de la ruta mínima
- Tiempo total de acceso (Tacc + Tacde)
- Nro del elemento Zo-Zd-Flujo asociado (Ipere).

En el caso de una asignación del tipo "todo o nada" entre zonas, el proceso es similar al anterior. En este caso los IP son reemplazados por el conjunto de elementos Zo-Zd-Flujo. Para cada uno de ellos se establece la ruta mínima entre los centroides respectivos y posteriormente el ISB que corresponda.

PROGRAMA MTP4

El programa MTP4 tiene incorporado tres procesos alternativos:

- Asignación de viajes a la red de transporte público.
- Cálculo de los componentes del tiempo generalizado de viaje.
- Cálculo de parámetros básicos para estimación de matrices de viaje.

Si bien, los procesos establecidos tienen finalidades claramente diferentes, ellos comparten una parte importante de las tareas que desarrolla MTP4.

A partir de los ISB, el programa da origen a los Itinerarios Simulados Definitivos (ISD). Estos contemplan la solución al problema de líneas comunes y en el caso de asignación a multi-rutas la solución al problema de elección entre las diferentes rutas alternativas existentes entre dos zonas.

Cada ISB da origen a tantos ISD como combinaciones de líneas comunes asociadas a cada sección de viaje existan. El conjunto de líneas comunes de una sección cualquiera, como se presenta en 4.a, se define en base a la "minimización del tiempo generalizado de viaje de la sección".

En el caso de asignación a multi-rutas, la probabilidad de elección de cada ruta alternativa se calcula según un modelo logit simple donde la función de utilidad queda representada por el "costo generalizado de viaje de la ruta", dado por:

$$CGV_{ruta} = b * (TACC + TTCAM) + \sum_{s \in S} TG_s + PT$$

donde:

- | | | |
|-----------------|---|---|
| TTACC | = | Tiempo total de acceso |
| TTCAM | = | Tiempo total de caminata sobre la red |
| b | = | Factor para ponderar tiempo de acceso y tiempo de caminata. |
| TG _s | = | Tiempo generalizado de viaje de la sección sés |
| PT | = | penalidad de transbordo total. |

PROGRAMA MTP5

Este programa se encarga de generar los resultados de la asignación. A partir de uno de los resultados de MTP4 ("red cargada") se preparan diferentes informes para fines de análisis.

a) Informes asociados a líneas

Incluyen información general de las líneas del sistema.
Entre ellas:

- Descripción de arcos utilizados por cada línea
- Tiempos de viaje por línea
- Número de pasajeros transportados
- Carga media de cada línea
- Identificación de arco con carga mínima y máxima
- Perfil de carga de pasajeros por línea

b) Información asociada a arco-líneas

Para cada arco de la red y las correspondientes líneas de transporte público que lo utilizan se entrega la siguiente información:

- Pasajeros totales por arco
- Pasajeros por cada línea de cada arco
- Tasa de ocupación media en el arco
- Línea con tasa de ocupación mínima y máxima por arco.

c) Información asociada a nodos de la red

Para cada nodo de la red se presenta la siguiente información:

- Número de pasajeros que entran o salen de la red en aquellos nodos asociados a arcos de acceso.
- Número de transbordos que se producen en cada nodo de la red.

PROGRAMA EMTP

Este programa estima matrices de viajes en transporte público a partir de una matriz a priori, de un conjunto de conteos en arcos, líneas y líneas en un arco determinado (arco-línea), y de los parámetros básicos (PIJAS) entregados por MTP4. Una descripción detallada del algoritmo de solución del problema puede encontrarse en De Cea y Cruz (1986).

3. CODIFICACION DE LA RED

La codificación de la red de transporte público está basada en la descripción de los recorridos de las líneas sobre los arcos definidos por el analista. En el caso de la red de superficie, las líneas son codificadas sobre arcos que resultan comunes a todos los modos existentes, no obstante, es posible establecer diferencias entre los tiempos de viaje de un modo y otro atendiendo a las características del arco y del modo en cuestión. En el caso de la red de Metro, la codificación está basada en arcos de viaje que son exclusivos y absolutamente independientes de la red de superficie.

La red de superficie y la red de Metro deben ser unidas exclusivamente mediante arcos de transbordo, de tal forma de representar la verdadera interacción que existe entre ellos de una manera fácil y clara desde el punto de vista de codificación (Figura 2).

El arco de transbordo es un elemento vital en la descripción de redes de transporte público. Si bien, muchos modelos no lo reconocen como tal en la etapa de codificación y prefieren asociarlo a líneas con atributos especiales, MOSARTP ha querido individualizarlo como un elemento de codificación básico.

En la representación de la red, los arcos de transbordo son usados principalmente en las siguientes situaciones:

- Para generar "puentes peatonales" entre nodos de superficie donde generalmente se efectúan transbordos que contemplan caminata.
- Para unir la red de superficie con la red de metro.
- Para unir dos o más líneas de Metro en aquellas estaciones donde se cruzan.

Internamente, el arco de transbordo es considerado una línea ficticia con características especiales. Esto ha permitido mantener casi intacta la estructura de representación interna de líneas usada en MADITUC (ver Chapleau, 1974), la cual fue diseñada especialmente pensando en los algoritmos de cálculo de rutas mínimas del tipo CTM (ver Chriqui, 1974), que fueron incorporados en MOSARTP.

En cuanto a la zonificación de la red, MOSARTP no se diferencia mayormente de los modelos actualmente en uso. La región servida por el sistema de transporte público es dividida en tantas zonas como el analista defina, atendiendo principalmente al tipo de análisis que se requiera. Cada zona queda representada por un centroide y un conjunto de arcos de acceso que lo unen con diferentes nodos de la red. Para efectos de asignación, el modelo requiere de los elementos no nulos de la matriz de viajes entre zonas del período en estudio.

4. DESCRIPCION DE ALGUNAS CARACTERISTICAS PARTICULARES DE MOSARTP.

a) Algoritmo de carga

MOSARTP, al igual que MADITUC, tiene implementado un algoritmo de asignación del tipo S/R X. Esto es, un algoritmo sin restricción al número de transbordos de un viaje, que considera un máximo de X líneas comunes en la etapa de cálculo de rutas mínimas y que asigna a todas las líneas comunes existentes en cada sección de las rutas mínimas obtenidas. Así, el objetivo de la primera etapa es determinar la ruta mínima "geográfica" entre dos nodos (definida por el nodo inicial, el nodo final y los nodos de transbordo de un desplazamiento), en tanto en la segunda etapa (carga) los flujos son asignados a todas las líneas comunes existentes en cada sección de la ruta. El valor del parámetro X es el resultado de un compromiso entre el error aceptable y el tiempo de cálculo requerido para la determinación de las rutas mínimas (Ver De Cea y Bunster, 1985). La diferencia entre ambos modelos radica en la forma en que se seleccionan las líneas comunes en la etapa de carga. Para explicar esta diferencia, consideraremos que el costo generalizado de viaje entre dos nodos servidos directamente por un conjunto de líneas, TG, puede separarse en dos términos: el tiempo de espera TE, que dependerá de la frecuencia de las líneas comunes, y el "tiempo de viaje en vehículo" TV, que considera todos los costos restantes (tarifa, tiempo de viaje en vehículo propiamente tal, etc.).

Considérese que para viajar entre el nodo A y el nodo B, existe un conjunto $L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\}$, con frecuencias $F = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_n)$ y "tiempos de viaje con vehículo" $TV = (t_{v1}, t_{v2}, t_{v3}, \dots, t_{vn})$. Considérese, además, que los tiempos de espera de las líneas l_i pertenecientes a L son variables aleatorias, independientes, exponencialmente distribuidas con medias $K/f_1, K/f_2, K/f_3, \dots, K/f_n$.

MADITUC hace una suposición simplificatoria para determinar el subconjunto de líneas comunes L_1 . Selecciona la línea l_1 perteneciente a L con el menor valor de t_{vi} . A continuación considera como comunes a l_1 , a todas las líneas l_j pertenecientes a L tal que $t_{vj} < C * t_{vi}$. Por ejemplo, se consideran comunes a una línea l_1 todas aquellas que pertenecen a L y que tienen un "tiempo de viaje en vehículo" de hasta 10% mayor que t_{vi} ($C=1.1$). Una vez hecho esto, reparte el flujo entre A y B entre las líneas de L_1 , proporcionalmente a sus frecuencias.

MOSARTP, en cambio, utiliza para resolver este problema el algoritmo "S" propuesto en Chriqui (1974) para determinar el subconjunto L_2 de L que minimiza el costo generalizado de viaje $TC(A, B)$. Si se define un vector $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ en el que $x_i = 1$ si $l_i \in L_2$ y $x_i = 0$ si $l_i \notin L_2$, el problema de selección del conjunto de líneas comunes se reduce a resolver el siguiente problema de optimización:

$$\text{Min } TG(A,B) = \text{Min}_X \frac{k + \sum_{i=1}^n t v_i f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i x_i}$$

Si se define $a_0 = k$, $b_0 = 0$, $a_i = t v_i * f_i$ y $b_i = f_i$ el problema anterior puede escribirse:

$$\text{Min}_X \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i}{b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i}$$

donde los coeficientes a_i , b_i , $i=0,1,2,\dots,n$ son todos no negativos. La expresión anterior representa un problema de programación hiperbólica (0,1) sin restricciones. Mientras el problema general ha sido resuelto por Hammer (1968) y Robillard (1971), el caso particular en que $a_0 = k$, $b_0 = 0$ y $a_i/b_i = t v_i$, que es el que nos interesa, se resuelve fácilmente usando el algoritmo "S" propuesto por Chriqui (1974).

Una vez determinado el conjunto L_2 la demanda es asignada entre las líneas comunes ($V \in L_2$), proporcionalmente a sus frecuencias.

Es fácil ver que en la medida en que todos los $t v_i$ sean iguales el resultado obtenido con ambos métodos será el mismo. Sin embargo cuando estos valores son diferentes, sólo el segundo método garantiza la obtención del conjunto óptimo de líneas comunes. En nuestro caso, en que los tipos de vehículos de las distintas líneas y las tarifas pueden ser diferentes (buses, microbuses, taxibuses) el enfoque de MOSARTP para determinar las líneas comunes en la etapa de carga es indiscutiblemente más adecuado.

b) Ahorro de etiquetas en algoritmo S/R 0

Los algoritmos de cálculo de rutas mínimas incorporados a MOSARTP están basados en el algoritmo CTM (Chriqui, 1974). La estructura y filosofía de CTM fue heredada, a su vez, del algoritmo de cálculo de rutas mínimas desarrollado por Dijkstra (1959), y como tal, funciona en base al etiquetaje de los nodos de la red.

En el caso de redes de transporte público, el etiquetaje se efectúa siguiendo el recorrido (secuencia de nodos) de cada una de las líneas que salen del nodo seleccionado como pivote. Este proceso es el responsable de una parte importante del tiempo de cálculo requerido para la aplicación del algoritmo y por ello, existe el interés permanente de estudiar modificaciones que permitan reducir el tiempo asociado.

En el caso de MOSARTP se ha incorporado una modificación al algoritmo original que permite reducir el número de etiquetas calculadas durante su aplicación.

En la figura 3, sea O el nodo de origen, P el nodo escogido como PIVOTE, L_P las líneas óptimas para alcanzar el nodo P y $L = (L_1, L_2, L_3, \dots, L_6)$ el conjunto de líneas que sale del nodo P en cualquier dirección.

El número de etiquetas que se calculan a partir de P depende del número de líneas en el conjunto L, del número promedio de nodos que atraviesa cada línea y de manera muy importante, del hecho que se establezca o no el concepto de accesibilidad de las líneas en cada nodo de la red.

En el caso de MOSARTP, donde todas las líneas son accesibles en todos sus nodos, el proceso de etiquetaje queda limitado estrictamente a aquellas líneas que salen de P usando un arco diferente al arco PQ, tales como las líneas L1, L2, L3. El etiquetaje a lo largo de las líneas L4, L5, L6 es redundante por cuanto es obvio que no van a constituir rutas mínimas a partir del nodo P.

Cuando se establece accesibilidad a los nodos, como es en el caso de MADITUC, el proceso de etiquetaje debe extenderse a todas las líneas del conjunto L. Solo de esta forma es posible asegurar la optimidad del algoritmo.

La diferencia en el número de etiquetas calculadas en uno y otro caso es evidente, sin embargo, el impacto sobre el tiempo total de cálculo dependerá básicamente de las características de la red (número de nodos, número de líneas, longitud de recorridos, etc). Se ha comprobado que en una red simplificada de Santiago (232 nodos y 272 líneas de locomoción colectiva) la disminución en el tiempo de cálculo del algoritmo por este concepto es del orden de 20%.

c) Arcos de Transbordo

En modelos de análisis de redes de transporte público, el uso de arcos de transbordo en la especificación de la red, ha estado reservado especialmente para representar aquellas situaciones donde se producen transbordos que contemplan caminata. Es decir, este tipo de arcos ha sido usado para generar "puentes peatonales" que permiten desplazamientos entre nodos de superficie.

En MOSARTP, el uso de arcos de transbordo se ha extendido al problema de representación de la red de Metro, especialmente en aquellos aspectos relacionados con el pago de tarifas. Se sabe que la tarifa que paga un individuo por utilizar una línea de Metro dada, no depende exclusivamente de la línea de que se trate. En aquellas estaciones que con comparten por dos o más líneas, la tarifa depende de la procedencia del individuo (red de superficie o red de metro) y en forma muy especial del sistema de tarifas implementado. Por ejemplo, en el caso de Santiago, las diferentes situaciones que se observan en la estación Los Héroes, se explican porque existen individuos que ingresan desde la superficie e individuos que realizan transbordo entre las líneas 1 y 2 y, por la existencia de un sistema de tarifas diferenciado.

MOSARTP ha tratado de recoger todas las situaciones de esta naturaleza que se puedan dar en el caso de Santiago y plantear una solución que resulte clara desde el punto de vista de codificación y que no comprometa la complejidad de los algoritmos de cálculo de rutas mínimas incorporados. Para ello, se ha establecido el concepto de "arcos de transbordo con tarifa incluida".

Para fines de codificación, es posible definir arcos del tipo "bus-metro", "metro-bus" y "metro-metro". Para cada uno de ellos es necesario definir la tarifa (si corresponde) y el tiempo de caminata asociado. En la figura 4 se muestra en forma esquemática la codificación correcta para una estación tal como Los Héroes. Es importante destacar, que este tipo de arcos es tratado internamente bajo el concepto de líneas ficticias, tal como se explicó en el capítulo anterior.

Este concepto de arcos de transbordo con tarifa incluida abre la posibilidad de tratar otras situaciones especiales, tales como servicios combinados metro-bus con tarifa compuesta.

d) Rutas combinadas mínimas: Metro-Bus y Bus-Metro

MOSARTP cuenta con algoritmos de cálculo de rutas que permiten establecer "rutas combinadas mínimas" del tipo Metro-Bus y Bus-Metro.

En la figura 5, sea L_1 una línea de Metro, O el nodo origen del viaje y D el nodo de destino. El nodo O tiene acceso directo al Metro mediante el arco de transbordo OA y el nodo D no tiene acceso directo al Metro. Bajo estas condiciones se puede establecer que la ruta combinada mínima entre O y D es del tipo Metro-Bus y que para identificarla bastaría con aplicar un algoritmo como S/R 0 que considere un etiquetaje parcial a partir del nodo O . Desde O debe etiquetarse sólo la "línea" OD , anulando de esta forma cualquier posibilidad de abandonar el origen por una de las líneas de superficie disponibles. Lo anterior asegura que la ruta establecida entre $O-D$ es el tipo Metro-Bus, entendiéndose por ello el uso de una o más líneas de Metro seguido por una o más líneas de superficie, y que constituye la ruta combinada mínima entre ambos nodos.

En el caso contrario, donde el nodo de origen no tiene acceso directo a Metro y el nodo de destino si lo tiene, la situación es diferente. Pensar en un algoritmo donde el etiquetaje se efectúa desde el nodo de origen hacia el resto de los nodos de la red (sentido tradicional de búsqueda) llevaría a soluciones bastante más complicadas que la planteada para el caso anterior. Por ello, para solucionar este problema, se ha diseñado un algoritmo del tipo "S/R 0 invertido con etiquetaje parcial en el nodo de destino". El proceso de etiquetaje se desarrolla desde el nodo de destino hacia el resto de los nodos de la red, recorriendo las líneas en sentido opuesto al desplazamiento de los vehículos. El etiquetaje parcial en el nodo de destino es equivalente al efectuado en el nodo origen del caso anterior.

e) Estimación de Matrices de Viajes en Transporte Público.

Como herramienta de análisis de redes de transporte público en un proceso de planificación continua, MOSARTP permite actualizar constantemente la información referente a la distribución de viajes (matrices origen-destino) a partir de una matriz a priori y de conteos realizados en la red. Para realizar dicha tarea se implementó en MOSARTP el algoritmo de estimación de matrices del modelo ESMATUC (Ver De Cea y Cruz, 1986), un modelo de estimación de matrices del tipo minimización de entropía que considera la codificación detallada de los recorridos existentes. Además de la información relativa a conteos de flujos en arcos de la red (que es la única utilizada en modelos de transporte privado) este modelo permite el uso de otros datos de interés tales como flujo sobre una línea en un arco dado (arco-línea) y pasajeros transportados por una línea en un período dado.

El modelo de estimación de matrices puede escribirse como:

$$\text{Max} - \sum_{w \in W} T_w (\ln(T_w / t_w) - 1) \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{w \in W} T_w P_{wa} - V_a = 0 \quad , \forall a \in A \quad (2)$$

$$\sum_{w \in W} T_w P_{wl} - n_l = 0 \quad , \forall l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{w \in W} T_w P_{wel} - V_{el} = 0 \quad , \forall el \in L \quad (4)$$

$$T_w \geq 0 \quad , \forall w \in W \quad (5)$$

donde:

- W : Conjunto de pares O/D existentes en la región servida por la red de transporte.
 T : Matriz de viajes a estimar (T_w , $w \in W$)
 ξ : Matriz "a priori" (ξ_w , $w \in W$)
 A : Conjunto de arcos de la red con conteos observados
 V_a : Flujo observado en el arco a
 P_{wa} : Proporción de viajeros entre el par w que utiliza el arco a .
 L : Conjunto de líneas con información sobre demanda en un período dado.
 n_l : Número de pasajeros transportados por el recorrido l (observado).
 P_{wl} : Proporción de viajeros entre el par w que utiliza la línea l .
 L_{al} : Conjunto de arco-líneas con conteos observados.
 V_{al} : Flujo observado de pasajeros en el arco-línea al .
 P_{wal} : Proporción de viajeros entre el par w que usa el arco-línea al .

Los parámetros P_{wa} , P_{wl} , y P_{wal} constituyen información de entrada básica del modelo y son obtenidos por el módulo MTP4 del modelo de asignación.

La solución del problema definido por las ecuaciones (1) a (5) es:

$$T_w = \xi_w \prod_{a \in A} (X_a)^{P_{wa}} \prod_{l \in L} (X_l)^{P_{wl}} \prod_{al \in L} (X_{al})^{P_{wal}}$$

donde los parámetros X_a , X_l y X_{al} son funciones de los multiplicadores de lagrange asociados a las restricciones respectivas:

$$X_a = e^{\lambda_a} \quad ; \quad X_l = e^{\lambda_l} \quad ; \quad X_{al} = e^{\lambda_{al}}$$

5. COMENTARIOS FINALES

MOSARTP puede considerarse un modelo análisis de redes de transporte público en desarrollo. En su estado actual es básicamente un modelo de asignación y de estimación de matrices de viajes a partir de conteos sobre la red. Ha sido desarrollado pensando en las particularidades de la red de Santiago y presenta la ventaja que al disponerse de la versión fuente de los programas computacionales (las mejores alternativas a MOSARTP habrían estado disponibles como "cajas negras") es posible incorporar continuamente las modificaciones que se estimen convenientes. En este sentido, la estructura modular del paquete computacional permite integrar a él en forma muy simple nuevas rutinas con el objeto de dar al modelo herramientas adicionales de análisis.

Una característica adicional de MOSARTP es su capacidad gráfica que se encuentra actualmente en su etapa de desarrollo. Esto permite la edición interactiva de redes y lo que es más importante, constituye un excelente apoyo al análisis de resultados. La edición de redes da la posibilidad al analista de modificar una red (agregar y eliminar arcos por ejemplo) a través de una pantalla gráfica. En lo que respecta al análisis de resultados, permite visualizar en una serie de gráficos los resultados más relevantes de una asignación, como una alternativa a los largos y tediosos listados numéricos, útiles solamente para analistas experimentados. Entre estos gráficos, vale la pena mencionar:

- a) Flujos en arcos de la red, o una parte de ella.
- b) Flujos en líneas seleccionadas de transporte público
- c) Flujo en arterias seleccionadas
- d) Pasajeros que suben y bajan en nodos seleccionados
- e) Nodos principales de transbordo en la red
- f) Comparación de flujos entre dos redes alternativas

En cuanto a desarrollos futuros, más allá de modificaciones menores que permitan tratar adecuadamente distintas políticas tarifarias, parece interesante pensar en dos módulos adicionales. En primer lugar un módulo de diseño de redes de transporte público. Esto es, una herramienta que dada una demanda de viajes y dado un conjunto de recorridos permita determinar frecuencias óptimas de servicio. El modelo actual en su parte de asignación, como la totalidad de los existentes, solamente se limita a determinar las rutas de los viajeros dada la demanda y un conjunto de recorridos de frecuencia fija.

Por último, un mejoramiento muy importante, y necesario en el caso chileno, del modelo de asignación es la consideración de la capacidad de los vehículos. MOSARTP, al igual que la totalidad en los modelos operacionales de redes de gran tamaño, no considera restricción de capacidad de los vehículos, lo que se traduce en muchos casos en asignaciones con sobrecarga. Este problema se enfrenta en la actualidad mediante la aplicación de métodos iterativos heurísticos que no garantizan convergencia.

REFERENCIAS

- BUNSTER J. P. (1986) - Tratamiento de Líneas Comunes en Modelos de Asignación de Viajes a Redes de Transporte Público, Tesis de Magister, Departamento de Ingeniería de Transporte Pontificia Universidad Católica de Chile.
- CHAPLEAU, R. (1974) Réseaux de transport en commun: structure informatique et affectations. Publication Nro 13, Centre de Recherche sur les Transports Université de Montréal, Canada.
- CHAPLEAU, R., ALLARD, B. Y CANOVA, M. (1982) MADITUC, un modèle de planification opérationnelle adapté aux entreprises de transport en commun de taille moyenne. Publication Nro 265, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Canada.
- CHRIQUI, C. (1974) Réseaux de transport en commun: les problèmes de cheminement et d'accès. Publication Nro 11, Centre de Recherche sur les transport, Université de Montréal, Canada.
- DE CEA J. (1982) Modèles d'Affectation de Réseau de Transport Collectif Urbain: Traitement de l'Accès et de la Diversion entre les Chemins. Thèse de Doctorat, Departamento de Genie Civil, Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canada.
- DE CEA, J. Y CHAPLEAU, R. (1984) MADITUC un modelo de asignación a rutas múltiples en redes de transporte público. Apuntes de Ingeniería 15, 113-140.
- DE CEA J. Y BUNSTER J. P. (1985) Asignación todo o nada a redes de transporte público: aplicación al caso de Santiago Segundo Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Santiago Chile 12-14 Noviembre 1985.
- DE CEA J. Y CRUZ G. (1986) ESMATUC: un Modelo de Estimación de Matrices de Viajes en transporte urbano colectivo. Apuntes Ingeniería 24, 109 - 125.
- DIJKSTRA, E. W. (1959) A note on two problems in connection with graphs. Numerische Mathematik 1, 269 - 271
- HAMMER, P.L. (1968) Boolean Methods in Operations Research, Springer - Verlag, New York.
- ROBILLARD, P., (1971) (0,1) Hyperbolic programming problems. Naval Research Logistics Quarterly, Vol 18, Nro 1.

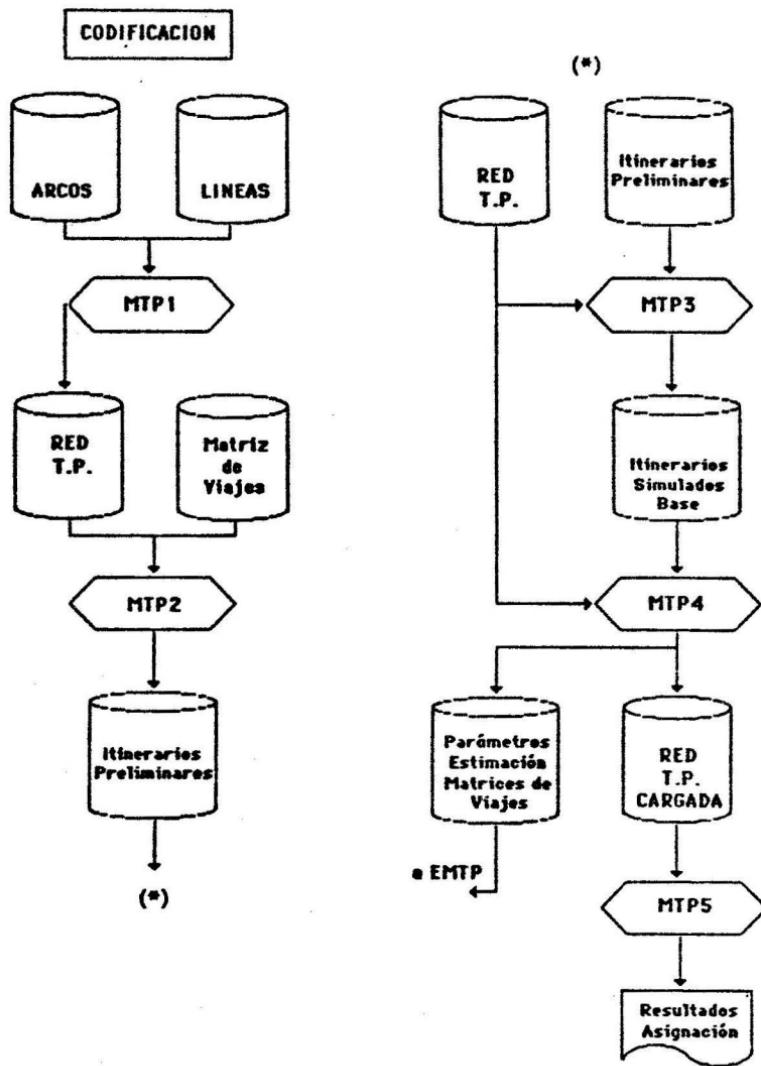


FIGURA 1: ESTRUCTURA GENERAL DE MOSARTP

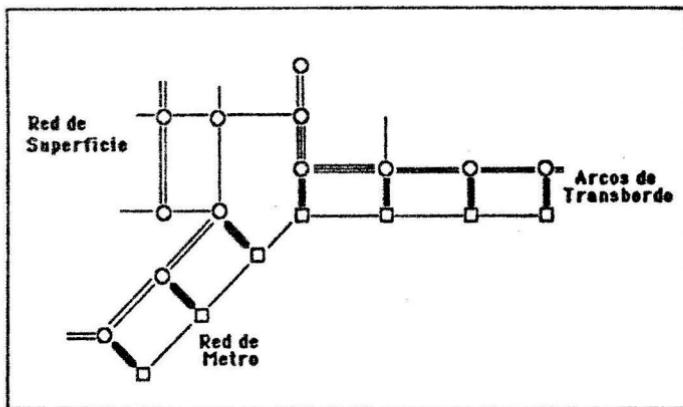


FIGURA 2: CODIFICACION REDES DE SUPERFICIE Y METRO

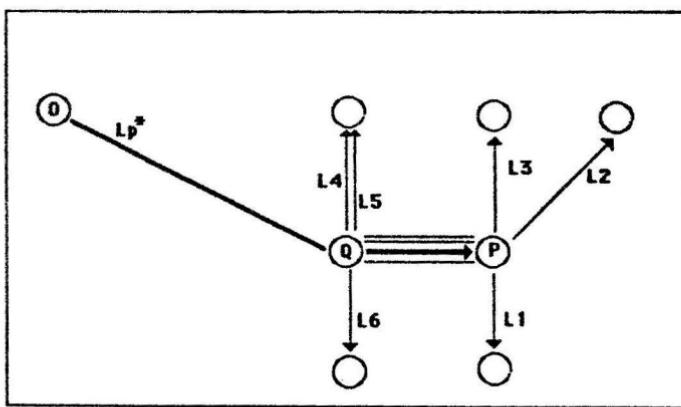


FIGURA 3: AHORRO DE ETIQUETAS ALGORITMO S/R 0

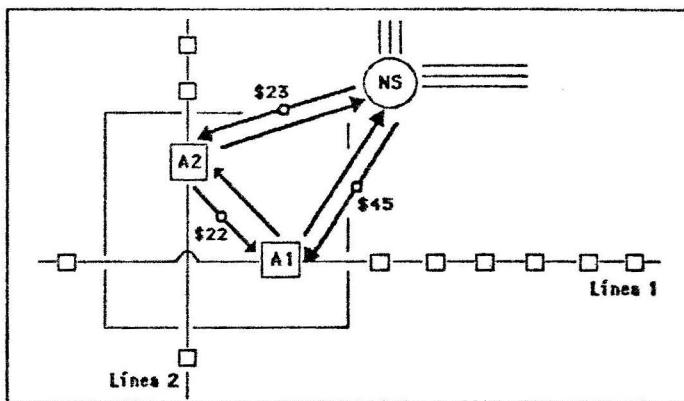


FIGURA 4: REPRESENTACION ESTACION LOS HEROES

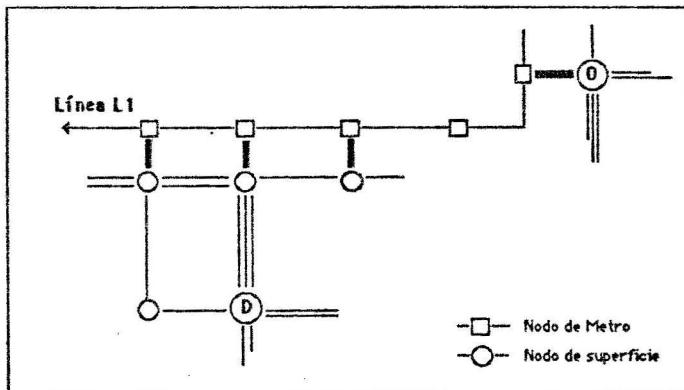


FIGURA 5: RUTA COMBINADA MINIMA METRO-BUS