

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE RECORRIDOS Y FRECUENCIAS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO COLECTIVO

Antonio Mauttone, María Urquhart

Departamento de Investigación Operativa, Instituto de Computación,
Facultad de Ingeniería, Universidad de La República,
Uruguay

RESUMEN

Se estudia el problema del diseño óptimo de recorridos y frecuencias para el transporte público urbano colectivo (*Transit Network Design Problem*). Enfoques anteriores han utilizado, en su mayoría, modelos de objetivo único y algoritmos aproximados (ávidos y genéticos) para su resolución. Este trabajo propone la utilización de un modelo de optimización multiobjetivo y de un algoritmo aproximado de resolución basado en la metaheurística *GRASP* (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*), que son extensiones y mejoras del modelo y algoritmo ávido propuesto por Baaj y Mahmassani (1991). El caso de estudio de *Mandl* fue usado para realizar pruebas y comparar resultados. Ahora se considera la validación con un caso de estudio real de dimensiones manejables, en cuya construcción se está trabajando. La información referente a la demanda se obtendrá mediante una encuesta a bordo de los buses, realizada en colaboración con personal de la Municipalidad de Rivera, Uruguay.

ABSTRACT

We study the optimal design of routes and frequencies for urban public transport (*Transit Network Design Problem*). Most previous approaches have used single-objective models and approximated algorithms (greedy and genetic algorithms mainly) to solve them. We propose a multiobjective optimization model based in the Baaj and Mahmassani (1991) model, and a *GRASP* (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) metaheuristic, which extends the greedy algorithm proposed by the same authors and improves some of its operations. The study case of *Mandl* was used to test the algorithm and to compare results. We are working with a real study case of manageable dimensions, the transit network of Rivera, Uruguay. The demand information will be obtained by making an on board bus survey, in collaboration with the municipality staff.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte público urbano colectivo es generalmente una tarea llevada a cabo por las entidades reguladoras (estado, municipalidad). La planificación a este nivel se realiza a menudo en base a la experiencia y sentido común de los técnicos responsables, eventualmente con el apoyo de guías y estándares; razón por la cual es de interés contar con herramientas automatizadas de apoyo para la mejora de tal proceso y de sus resultados.

En este contexto, se estudia el *Transit Network Design Problem* (*TNDP*), que consiste en encontrar un conjunto óptimo de recorridos y frecuencias, bajo restricciones de cubrimiento de demanda, niveles de servicio y disponibilidad de flota. Los objetivos a optimizar involucran los intereses de los usuarios (minimizar tiempos de viaje y espera) y de los operadores (minimizar costos operativos, tamaño de flota); estos objetivos son contrapuestos, es decir, una mejora en uno se logra solamente con un detrimento en el otro.

En la mayoría de los trabajos publicados (con la salvedad del de Ceder e Israeli, 1998) el problema de optimización multiobjetivo *TNDP* es formulado mediante un modelo de objetivo único; los diferentes objetivos se combinan usando coeficientes, que cumplen con los siguientes dos propósitos: a) realizar la conversión entre las diferentes unidades, y b) reflejar la importancia relativa de los objetivos contrapuestos. La conversión entre diferentes unidades es resuelta, generalmente, mediante la aplicación de modelos de estimación de valores subjetivos del tiempo (Ortúzar y Willumsen, 1996). La ponderación *a priori* de los diferentes objetivos, en cambio, plantea un problema de difícil resolución, ya que requiere de

información adicional, generalmente consiste en una decisión tomada por el responsable de la toma de decisiones. Los algoritmos de resolución existentes se agrupan en dos categorías: a) heurísticas clásicas de optimización (Axhausen y Smith, 1984; Baaj y Mahmassani, 1995; Ceder e Israeli, 1998), y b) aplicaciones de *Algoritmos Genéticos* (Pattnaik *et al*, 1998; Ngamchai y Lovell, 2003).

2. MODELO

En este trabajo se formula un modelo basado en el propuesto por Baaj y Mahmassani (1991), al que se le han incorporado explícitamente la característica multiobjetivo y las restricciones (3) y (4).

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} (tv_{ij} + te_{ij} + tt_{ij}) \quad (\text{costos de usuarios, tiempo acumulado}) \quad (1)$$

$$\min \sum_{r_k \in R} f_k t_k \quad (\text{costos de operadores, tamaño de flota}) \quad (2)$$

s.a.

$$D_0 \geq D_0^{\min} \in [0,1] \quad (\text{cobrimiento de demanda directa}) \quad (3)$$

$$D_{01} \geq D_{01}^{\min} \in [0,1] \quad (\text{cobrimiento de demanda directa e indirecta}) \quad (4)$$

$$f_{\min} \leq f_k \leq f_{\max} \quad \forall f_k \in F \quad (\text{frecuencias factibles}) \quad (5)$$

$$LF_k = \frac{\phi_k^*}{f_k CAP} \leq LF_{\max} \quad \forall r_k \in R \quad (\text{factor de carga de los buses}) \quad (6)$$

$$R \subseteq \Omega \quad f_k \in \mathfrak{R}^+$$

La resolución del modelo de optimización multiobjetivo implica encontrar todas las soluciones no dominadas que conforman el frente de Pareto (Deb, 2001). Cada solución consiste en un conjunto de recorridos con frecuencias asociadas.

3. ALGORITMO

La resolución exacta de este modelo de optimización multiobjetivo presenta las siguientes dificultades: a) la formulación no es directamente transformable a una formulación estándar de programación matemática, b) la determinación de la secuencia de nodos que componen los recorridos es un problema de alta complejidad combinatoria (Ceder e Israeli, 1998), y c) es un modelo de variables mixtas, la estructura de los recorridos es representada por medio de variables discretas, mientras que las frecuencias son representadas por variables reales. En este trabajo se propone un algoritmo aproximado, basado en la metaheurística *GRASP*.

GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) consiste en la ejecución repetida de una heurística de construcción aleatoria de soluciones, cuyo resultado es mejorado mediante una búsqueda local (Resende y Ribeiro, 2003). La característica aleatoria de la heurística de construcción permite la exploración de diferentes alternativas dentro del espacio de soluciones. En este trabajo se ha utilizado el algoritmo de Baaj y Mahmassani (1995) como base para la heurística de construcción, al que se han incorporado reglas aleatorias en la toma de determinadas decisiones.

Cada solución generada por la heurística de construcción es mejorada mediante la aplicación de un procedimiento de búsqueda local, que a su vez consiste en aplicar sucesivas mejoras a

esa solución. Para el algoritmo propuesto en este trabajo, las mejoras se efectúan mediante la aplicación de dos operaciones:

- 1) *SubRecorrido*: Identifica el tramo de mayor ocupación en recorridos donde el nivel de ocupación de los buses es significativamente variable, y genera un recorrido adicional que cubre dicho tramo. De esta forma, se reduce la frecuencia en el recorrido original, estableciendo una mayor frecuencia en el nuevo recorrido, que es más corto. Variantes de esta operación han sido propuestas en (Ngamchai y Lovell, 2003).
- 2) *Transbordo*: Crea un nuevo recorrido a partir de otros dos, que registren un alto número de transbordos de pasajeros entre ellos. Variantes de esta operación han sido propuestas en (Fernández *et al*, 2003).

La búsqueda local aplica sucesivamente estas dos operaciones de mejora, y finaliza cuando se obtiene una solución dominada (que empeora la función en todos los objetivos).

El cálculo de las funciones objetivo requiere de la consideración de un modelo de asignación de pasajeros; éste aplica las hipótesis de comportamiento de los pasajeros con respecto a las distintas opciones de viaje, y realiza la distribución de la demanda en el conjunto de recorridos (Florian, 2003). En este trabajo se utiliza el modelo de asignación de Baaj y Mahmassani (1990), el que, en el contexto del modelo de optimización, cumple con los siguientes propósitos: a) calcular los valores de las funciones objetivo (1) y (2), b) determinar los valores de las frecuencias.

4. ESTUDIO COMPUTACIONAL Y RESULTADOS NUMÉRICOS

El algoritmo para el diseño de recorridos y frecuencias se ha implementado, y se ha probado con el caso generado por Mandl en 1979, reportado en (Baaj y Mahmassani, 1991). Se han realizado dos tipos de experimentos: a) pruebas de calibración de los parámetros del algoritmo, y b) pruebas de comparación con resultados de otros autores. En esta última categoría de pruebas, los resultados numéricos con el caso de Mandl muestran que el método utilizado en este trabajo obtiene mejores soluciones que los reportados en (Baaj y Mahmassani, 1991), obtenidos por su algoritmo que es una heurística ávida pura.

5. CASO DE ESTUDIO

Uno de los objetivos de esta tesis plantea la validación del algoritmo implementado con un caso de estudio real. Se plantea la construcción de un caso de dimensiones manejables, y se toma como caso de estudio, la ciudad de Rivera, Uruguay. Esta tiene una población de aproximadamente 80000 habitantes; cuenta con un sistema de transporte público que consta de 13 líneas operadas por 3 empresas, que transportan aproximadamente 7000 pasajeros por día. Es de interés para las autoridades locales realizar este estudio. Los técnicos responsables han detectado los siguientes problemas: a) competencia entre muchas líneas para servir los mismos pares origen-destino, y b) baja utilización de los buses en determinados tramos de algunas líneas.

Los principales datos requeridos para la construcción del caso son:

- Topología de la red subyacente: Consiste en la red, formada por nodos y conexiones entre nodos. Cada nodo corresponde a un centroide de una zona, de una determinada división zonal de la ciudad. Su construcción se basa en información digitalizada en formato CAD, disponible por parte de la Intendencia Municipal de Rivera (IMR).
- Demanda de viajes: Se representa mediante una matriz origen-destino de tamaño $n \times n$, donde n es la cantidad de zonas. No existe un relevamiento de la demanda hasta el

momento. Se plantea la realización de una encuesta de movilidad a bordo de los buses. La ejecución de la misma se lleva a cabo con la colaboración del personal de IMR. El diseño de la muestra trata de realizar un cubrimiento espacial y temporal uniforme, a partir de los recursos disponibles (Stopher *et al*, 1985). Los datos se obtienen a nivel de paradas, por lo que requieren de un pos-procesamiento para llevarlos al nivel de definición de zonas.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo propone la utilización de un modelo multiobjetivo para el problema de optimización de recorridos y frecuencias en el transporte público, y de técnicas de resolución (metaheurística GRASP) que han sido exitosas en el área de la optimización combinatoria, pero que no se han aplicado hasta ahora en el contexto del *TNDP*.

La validación del método requiere de su aplicación a un caso real, en cuya construcción se trabaja actualmente. Las tareas pendientes para la construcción del caso constan de la ejecución de las encuestas a bordo de los buses, el procesamiento de estos datos, y la construcción de una topología de red subyacente. Posibles ajustes al modelo y al algoritmo pueden surgir luego de realizar las pruebas con el mencionado caso de estudio.

Referencias Bibliográficas

- Axhausen, K. W. y Smith, R. L. (1984) Evaluation of Heuristic Transit Network Optimization Algorithms. *Transportation Research Record*, n. 976, p. 7-20.
- Baaj, M. H. y Mahmassani, H. S. (1990) TRUST: A LISP Program for the Analysis of Transit Route Configurations. *Transportation Research Record*, n. 1283, p. 125-135.
- Baaj, M. H. y Mahmassani, H. S. (1991) An AI-based Approach for Transit Route System Planning and Design. *Journal of Advanced Transportation*, v. 25, n. 2, p. 187-210.
- Baaj, M. H. y Mahmassani, H. S. (1995) Hybrid Route Generation Heuristic Algorithm for the Design of Transit Networks. *Transportation Research C*, v. 3, n. 1, p. 31-50.
- Ceder, A. e Israeli, Y. (1998) User and Operator Perspectives in Transit Network Design. *Transportation Research Record*, n. 1623, p. 3-7.
- Deb, K. (2001) *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Ed. John Wiley and Sons.
- Fernández, J.; de Cea, J. y Norambuena, I. (2003) Una Metodología para el Diseño Topológico de Sistemas de Transporte Público Urbano de Pasajeros. *Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, SOCHITRAN, Santiago, p. 219-231.
- Florian, M. (2003) Frequency based Transit Route Choice Models. In: Lam, W. y Bell, M. (eds.) *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*.
- Ngamchai, S. y Lovell, D. J. (2003) Optimal Time Transfer in Bus Transit Route Network Design Using A Genetic Algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, v. 129, n. 5, p. 510-521.
- Ortúzar, J. de D. y Willumsen, L. G. (1996) *Modelling Transport*. Ed. John Wiley and Sons.
- Pattnaik, S. B.; Mohan, S., y Tom, V. M. (1998) Urban Bus Transit Route Network Design using Genetic Algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, v. 124, n. 4, p. 368-375.
- Resende, M. G. C. y Ribeiro, C. Celso (2003) Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. In: Glover, F. y Kochenberger, G. A. (eds.) *Handbook of Metaheuristics*.
- Stopher, P.R.; Shillito, L.; Grober, D. T. y Stopher, H. M. A. (1985) On-Board Bus Surveys: No Questions Asked. *Transportation Research Record*, n. 1085, p. 50-57.

Antonio Mauttonne, Estudiante de Maestría en Informática, mauttonne@fing.edu.uy

María Urquhart, Orientadora de Tesis, urquhart@fing.edu.uy

Departamento de Investigación Operativa, Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

J. Herrera y Reissig 565, Piso 5, Montevideo, Uruguay. CP 11300.