

# DISEÑO ROBUSTO DE RUTAS Y FRECUENCIAS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

Gabriel Winter<sup>1</sup>, Begoña González<sup>1</sup>, José A. Moreno-Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (IUSIANI). División de Computación Evolutiva y Aplicaciones (CEANI), ULPGC. Edif. Central del Parque Científico y Tecnológico, 2ª Planta Drcha., 35017 Las Palmas de G.C. [gabw@step.es](mailto:gabw@step.es), [bgonzalez@iusiani.ulpgc.es](mailto:bgonzalez@iusiani.ulpgc.es)

<sup>2</sup>DEIOC, Instituto Universitario de Desarrollo Regional (IUDR), Universidad de La Laguna. [jamoreno@ull.es](mailto:jamoreno@ull.es)

## Introducción

Hoy en día, las empresas de transporte de viajeros necesitan buscar nuevas formas de aumentar sus ingresos, mejorar la calidad del servicio y reducir los costos. Por lo tanto, la optimización de un sistema de transporte público urbano (TPU) plantea múltiples objetivos del tipo: minimizar tiempos de viaje y espera (maximizar la calidad del servicio) y maximizar el beneficio de las empresas transportistas. Estos objetivos son generalmente contrapuestos, es decir, una mejora en uno implica un empeoramiento en el otro.

Frutos et al (2007) realizaron un estudio del estado del arte respecto a modelos y algoritmos que resuelven el problema del diseño y optimización de rutas y frecuencias en el TPU, que se corresponde con un NP-Completo (Ceder et al., 1998; Baaj et al., 1991). Además, propusieron un algoritmo que establece varias etapas de procesamiento, enmarcadas dentro del esquema clásico de un Algoritmo Evolutivo (AE) monoobjetivo, que es un enfoque distinto de solución al modelo propuesto por Gruttner et al (2002). Nosotros proponemos aquí resolver dicho problema aplicando técnicas de Optimización Multiobjetivo con Diseño Robusto. Por un lado, la resolución multiobjetivo nos permite eliminar los pesos que aparecen en la función objetivo monoobjetivo. Por otro lado, el diseño robusto nos permite incluir las incertidumbres asociadas al total de viajeros que atrae cada línea y a los tiempos de acceso, de espera y de viaje del usuario entre nodos (paradas) de cada línea.

## Planteamiento del problema a resolver

El problema se plantea como un problema multiobjetivo donde una solución candidata en el espacio de búsqueda  $x$  está representado como un conjunto de rutas, cada ruta se encuentra ordenada desde un nodo inicial ( $N_S$ ) a un nodo final ( $N_F$ ), y sus respectivas frecuencias. Además, las funciones a optimizar son las siguientes:

$$\text{Maximizar el beneficio del operador: } f_{bo}(x) = \sum_{L=1}^M (IO_L - CO_L)$$

siendo:

$IO_L = AF_L T_L$ : Ingreso operador de la línea  $L$ .

$CO_L = D_L K_L$ : Costo operador de la línea  $L$ .

$AF_L$ : Afluencia total de pasajeros que atrae la línea  $L$ .

$T_L$ : Tarifa cobrada por la línea  $L$ .

$D_L$ : Distancia recorrida por la línea  $L$ .

$K_L$ : Costo unitario de operación por kilómetro de la línea  $L$ .

$$\text{Minimizar el costo del usuario: } f_{cu}(x) = \sum_{L=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (t_{ijL}^a + t_{ijL}^v + t_{ijL}^e) V_{ijL}$$

siendo:

$t_{ijL}^a$ ,  $t_{ijL}^v$ ,  $t_{ijL}^e$  : tiempos de acceso a la línea  $L$ , de viaje y de espera, respectivamente.

$V_{ijL}$ : Número de viajes sobre cada arco  $(i, j)$  correspondiente a la línea  $L$ .

Algunas variables del modelo presentan una fuerte variabilidad relacionada con la aleatoriedad del sistema. Éstas incluyen la afluencia total de viajeros que atrae cada línea ( $AF_L$ ) y los tiempos de acceso, de espera y de viaje del usuario entre nodos (paradas) de cada línea ( $t_{ijL}^a$ ,  $t_{ijL}^v$  y  $t_{ijL}^e$ ).

## Diseño Robusto

La necesidad de métodos de optimización con diseño robusto aparece cuando se desconoce el valor exacto de algunos parámetros de entrada. Consecuentemente, el objetivo es intentar buscar una solución que dependa lo menos posible de los parámetros de entrada desconocidos. Otro asunto importante en el problema de optimización es cómo hallar una solución que sea insensible, o sólo ligeramente sensible, a pequeñas fluctuaciones en los parámetros de entrada. A partir de los conceptos estadísticos de rendimiento y estabilidad, la optimización con diseño robusto busca soluciones simultáneamente buenas para el rendimiento y la estabilidad. Las siguientes ecuaciones representan el valor medio (rendimiento) y la varianza (estabilidad) de la función a optimizar usando el enfoque denominado optimización con diseño robusto:

$$\bar{f}(\bar{x}) = \frac{\sum_{n=1}^N f_n}{N}$$

$$\sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2}{N - 1}$$

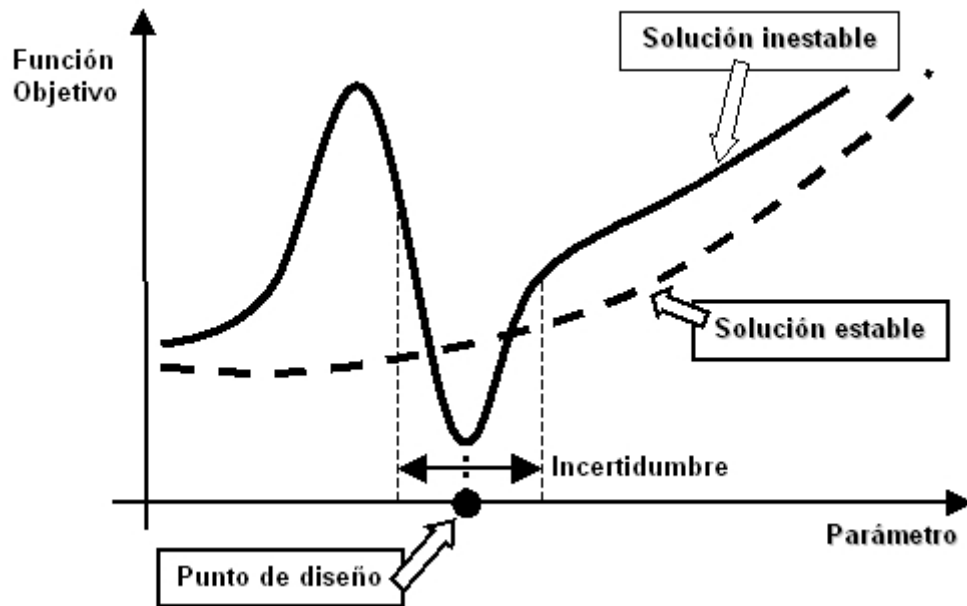
donde  $\bar{x}$  representa un punto de diseño,  $N$  es el número de puntos  $x_n$ , en el intervalo de incertidumbre definido en torno al punto de diseño (ver Fig. 1), que se consideran para la evaluación del rendimiento y la estabilidad en el punto de diseño  $\bar{x}$  y  $f_n = f(x_n)$  es el valor de la función objetivo en cada punto  $x_n$ .

Para resolver la optimización con diseño robusto se puede usar cualquier algoritmo de optimización eficiente. Aquí proponemos aplicar Optimización Multiobjetivo, con lo que finalmente tendremos cuatro funciones objetivo a optimizar:

$$\text{Max } \bar{f}_{bo}(\bar{x}); \text{ Min } \sigma_{bo}^2(\bar{x}); \text{ Min } \bar{f}_{cu}(\bar{x}); \text{ Min } \sigma_{cu}^2(\bar{x})$$

## Optimización Multiobjetivo

Para la resolución del problema se puede usar cualquier eficiente Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo. Nosotros proponemos el uso de una adaptación multiobjetivo del Agente de Evolución Flexible desarrollado en el CEANI (Winter et al, 2005).



**Fig. 1** Solución estable versus solución inestable en el entorno de un punto de diseño.

## Referencias

- Baaj, M.H. and Mahmassani, H.S., An AI-Based Approach for Transit Route System Planning and Design, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 25(2), 187-210, 1991.
- Ceder, A. and Israeli, Y., User and Operator Perspectives in Transit Network design, *Transportation Research Record*, Vol. 1623, 3-7, 1998.
- Frutos, M., Casal, R., Olivera, A.C., Algoritmo híbrido estocástico aplicado al diseño de rutas y determinación de frecuencias en el transporte público urbano, V Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB2007), 31-37, 2007.
- Gruttner, E., Pinninghoff, M.A., Tudela, A. y Díaz, H. Recorridos Óptimos de Líneas de transporte Público Usando Algoritmos Genéticos, *Jornadas Chilenas de Computación*, Copiapó, Chile, 2002.
- Winter, G., Galván, B., Alonso, S., González, B., Greiner, D., Jiménez, J.I., Flexible Evolutionary Algorithms: cooperation and competition among real-coded evolutionary operators. *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*. 9 (4), pp. 299-323. Springer-Verlag, 2005.