

Recorridos Optimos de Líneas de Transporte Público Usando Algoritmos Genéticos

E. Gruttner, M. A. Pinninghoff, A. Tudela, H. Díaz

Departamento de Ingeniería Informática y Cs. de la Computación.
Departamento de Ingeniería Civil.
Universidad de Concepción, Chile.
E-mail: mapinnin@inf.udec.cl

Resumen

Este artículo presenta una aplicación de Algoritmos Genéticos a la solución de un problema de transporte. Específicamente, se enfrenta el problema de determinar nuevas rutas de transporte público, aplicando la estrategia desarrollada a la ciudad de Los Angeles, Chile. Se presentan las restricciones asociadas al problema y la forma como se adecuaron las técnicas existentes al problema particular, y se discuten las proyecciones que emanan de lo realizado, cuestión que por lo demás contó con la aprobación de los expertos en términos de calidad de las soluciones encontradas.

Palabras Clave. Algoritmos genéticos, transporte, optimización.

1. Introducción.

La gran variedad de objetivos, recursos y restricciones que suelen tener los problemas de transporte, en general, hacen difícil su tratamiento con métodos de optimización exactos. Se trata de problemas cuyo espacio de soluciones crece exponencialmente con el número de puntos de destino (o la combinación de rutas posibles), haciendo inviable la búsqueda determinística de la solución con métodos exactos; por otro lado existe una amplia variedad de métodos heurísticos y probabilísticos que no garantizan encontrar la solución óptima, pero que permiten rastrear razonablemente el espacio de soluciones aprovechando la particularidad de cada problema específico que se pretende resolver.

En este ámbito, los programas evolutivos en general, y los algoritmos genéticos (AG) en particular están siendo utilizados con éxito en la solución de problemas de optimización no lineales complejos [6], ya que presentan características de flexibilidad, robustez y adaptabilidad adecuados para atacar los problemas combinatorios asociados a la optimización de sistemas y redes de transporte reales.

Este trabajo presenta una aproximación a la resolución del problema de búsqueda de recorridos óptimos para líneas de transporte de pasajeros. La formulación del problema, por su naturaleza, fue planteada como un problema multi-objetivo, ya que en ella fueron incorporados de manera explícita tanto los beneficios para los operadores de las líneas como los beneficios de los usuarios de dichas líneas de transporte.

El problema se ha enfrentado con el uso de algoritmos genéticos y se discuten los resultados obtenidos con el software desarrollado, al aplicarlo sobre la ciudad de Los Angeles, Octava Región, Chile.

2. El problema.

Este trabajo se centra en el transporte de personas, denominado transporte público, urbano o suburbano, al que se accede mediante el pago de una tarifa fija y que se lleva a cabo con servicios regulares establecidos en rutas señaladas, horarios determinados y paradas específicas.

La red de transporte donde se ubican las rutas posibles se modela a través de un grafo dirigido, $G = (N, A)$, donde N representa intersecciones de calles o vías, paraderos o algún otro punto de interés

específico; A representa los segmentos de calles o vías que unen elementos de N (es decir, en el grafo elementos $a \in A$, los arcos, unen elementos de $n \in N$, los nodos) [8].

En la red de transporte se requiere un equilibrio entre la oferta y la demanda por transporte. La oferta está conformada por la red de caminos con sus costos asociados, los que están determinados en función de distancias, velocidad de flujo libre, capacidad y relación velocidad-flujo. La red de transporte público contiene especificaciones adicionales de los servicios ofrecidos en términos de sus rutas, capacidades y frecuencias.

La demanda está conformada por una identificación del número de viajes por unidad de tiempo entre pares *Origen-Destino* y el modo de transporte que podría ser utilizado para un nivel de servicio dado. El nivel de servicio está definido principalmente por el tiempo de viaje, tarifa y comodidad. Si el nivel del servicio disminuye, se puede esperar una reducción en la demanda, cambios de destino, modos, etc.

Los objetivos considerados en el trabajo presente corresponden a la maximización del beneficio neto privado del operador, la maximización del beneficio neto de los usuarios del sistema de transporte, o una combinación de ambos, en cuyo caso se tratará del beneficio neto del sistema.

Las restricciones a considerar son las siguientes:

- Existe un nodo origen x_o desde el cual sólo se puede salir (y ningún arco llega)
- Existe un nodo destino x_d al cual sólo se puede llegar (y ningún arco sale)
- Los subciclos deben ser eliminados
- La ruta debe ser una secuencia conexa de nodos desde x_o hasta x_d
- Existe un origen y destino únicos para cada ruta. Esto representa la mitad del viaje, que debe ser complementado con un respectivo viaje de retorno (donde se invierten los papeles del origen y el destino)
- No todos los nodos deben ser visitados, con excepción del origen y el destino

Formulación del Problema

Para formular y resolver este problema, es posible utilizar el método de los pesos para encontrar el conjunto de soluciones no inferiores [1]. Este método consiste en juntar las funciones objetivo usando diferentes coeficientes (pesos) para cada una de ellas.

Aquí es necesario considerar dos funciones objetivo: la del público usuario que desea minimizar el costo del transporte, en cuanto costo monetario y de tiempo, y la del operador que pretende obtener el mayor ingreso al menor costo.

Así, la función objetivo es:

$$F = MAX(\alpha * FO(R_i) - \beta * FU(R_i)), \text{ donde}$$

R : Conjunto de rutas válidas

R_i : i -ésima ruta válida $R_i \in R$

FO : Función de beneficio del operador

FU : Función de costo del usuario

α y β : Peso para el operador y el usuario respectivamente, que representan la importancia relativa de estos. Deben satisfacer $\alpha + \beta = 1$ y $\alpha, \beta \geq 0$.

A su vez,

FO = Ingreso operador - Costo operador

Ingreso operador: $IO_L = AF_L * T_L$

Costo operador: $CO_L = Distancia_L * K_L$

Costo usuario: $CU_L = \sum_i \sum_j [(\delta * t_{i,j,L}^a + t_{i,j,L}^v + \eta * t_{i,j,L}^e) VST * V_{i,j,L}]$,
donde

AF_L : Afluencia total de viajes que atrae la nueva ruta L

T_L : Tarifa cobrada por la nueva línea L

K_L : Costo unitario por kilómetro

$t_{i,j,L}^a$: Tiempo de acceso a la línea

$t_{i,j,L}^v$: Tiempo de viaje

$t_{i,j,L}^e$: Tiempo de espera

VST : valor subjetivo del tiempo de viaje, considerado como valor social

$V_{i,j,L}$: Número de viajes entre cada par Origen-Destino (i,j) para la nueva línea L

δ y η : peso relativo del tiempo de acceso y espera con respecto al tiempo de viaje.

3. Implementación con AGs

Los algoritmos genéticos son técnicas de optimización muy flexibles y robustas que emulan los procesos de evolución natural de organismos complejos y tienen una gran capacidad para explorar en paralelo el espacio de soluciones. Estos algoritmos establecen primero una relación entre una solución concreta y su codificación, después se crea una población inicial de soluciones, que puede ser muy mala, y se la somete a procesos cíclicos de selección, cruzamiento y mutación, mejorando la calidad de las soluciones en las generaciones sucesivas hasta alcanzar un punto de equilibrio que es o está muy cerca de la solución óptima del problema [6].

La elección de la codificación para este problema se alejó de las codificaciones tradicionales en AGs por causa de la restricción fuerte de que la ruta debía ser conexa (una agrupación aleatoria de nodos y arcos resulta en la mayoría de los casos en rutas no conexas).

En este trabajo, los nodos constituyen intersecciones de calles y son numerados de 1 hasta n . En el cromosoma una ruta válida completa se representa mediante la secuencia de nodos que la componen. Los cromosomas son de largo fijo, de tamaño suficiente para contener la ruta válida más extensa, y cuando la ruta tiene una cantidad de nodos menor, el cromosoma se rellena con símbolos especiales para indicar la no existencia de nodos. La secuencia válida es obtenida desde una matriz de vecindad, donde las filas representan los nodos y las columnas sus posibles destinos; o sea, es una matriz de $n * m$, donde n es el número de nodos y m es el número máximo de arcos salientes de cada nodo (típicamente las esquinas tienen intersecciones de cuatro direcciones) [5].

Población Inicial.

La población inicial está formada por una cantidad fija de rutas válidas. Para garantizar que las rutas de la población inicial fueran válidas, se utilizó un algoritmo de *fuerza bruta* [5] cuestión que permitió asegurar

la variabilidad de las posibles soluciones.

Selección.

Para la selección de cromosomas a ser cruzados se eligió como mecanismo la *Ruleta* [2]. Este mecanismo, utilizado por Goldberg [4] consiste en crear una ruleta en la que cada cromosoma tiene asignada una fracción del área total, proporcional a su aptitud (evaluación). Debido a que los individuos más aptos tienen asignada una mayor área de la ruleta, sus posibilidades de ser seleccionados para el paso siguiente son mejores que aquellos que tienen un área menor.

Por otra parte, dado que la función objetivo puede tomar valores negativos, es necesario realizar un desplazamiento de los valores de las aptitudes para uniformar en valores no negativos. Este desplazamiento sólo se realiza para efectuar el paso de selección, y una vez que el mecanismo de la *Ruleta* se ha dejado de usar, los valores de aptitud se restauran a sus valores originales.

Cruzamiento.

Para el cruzamiento, se eligió cruzamiento simple [4, 3] con una adaptación al problema particular. Esto es porque un cruzamiento simple puro uniría dos porciones de rutas distintas en una nueva ruta, lo que podría generar individuos infactibles (el hijo así creado puede ser no conexo) [5]. El uso de operadores de cruzamiento para permutaciones tampoco sirve en este caso, ya que la suposición necesaria de todos los nodos conectados podría muy posiblemente no darse en este problema [7]. Se procede de la siguiente forma: se elige al azar un punto entre 1 y n (el largo del padre); se buscan las conexiones del nodo que son entonces candidatas a punto de corte; eligiendo una de estas conexiones al azar y procediendo a buscar entonces en el cromosoma *madre*. Si la conexión existe en la madre, entonces el hijo hereda desde el comienzo hasta el punto de corte del cromosoma la información del padre, y desde esa conexión hasta el final la información de la madre.

Si no hay conexión se repite el proceso para otro nodo hasta encontrar las conexiones. Luego, se repite el proceso, pero comenzando con el cromosoma *madre* para encontrar el segundo hijo.

Finalmente, se comparan los padres con los hijos y se eligen sólo los mejor evaluados.

Mutación.

En este problema, la variación en un elemento del cromosoma significa fragmentar la ruta más que buscar la variabilidad. Por ello, se usó el reemplazo de un cromosoma completo, elegido al azar, con una probabilidad del 1%. El cromosoma reemplazante es generado de la misma forma de la población inicial.

El Prototipo.

Los datos de entrada para el programa son:

- La matriz de adyacencia
- Descripción de los arcos (nombres de las calles)
- Matriz de vecindad para los nodos
- Coeficientes α y β
- Datos adicionales (tarifa, velocidad de caminata, etc.)
- Nodo origen y nodo destino
- Descripción de las líneas de transporte actualmente en uso

Los resultados obtenidos por el programa son:

- Ruta o rutas que satisfacen los requerimientos
- Distancia recorrida, tiempo de viaje, afluencia, ingreso operador, costo operador, costo usuario y bondad de la ruta

Adicionalmente, el programa también entrega:

- Nombre de las calles que conforman la ruta
- Recorrido de cada línea funcionando en la actualidad

Para la implementación del software se eligió Microsoft Visual Basic 6.0, por su flexibilidad y capacidad gráfica.

4. Resultados.

Se realizaron dos tipos de prueba. Dentro de cada uno de los tipos se consideró además tres situaciones:

- 100 % beneficio para el operador
- 50 % de beneficio para el operador y 50 % de beneficio para el usuario
- 100 % de beneficio para el usuario

El primer tipo de pruebas considera un nodo origen y un nodo destino elegidos al azar.

El segundo tipo consiste en eliminar una ruta de una línea de transporte existente y buscar su reemplazo mediante la asignación de los mismos nodos origen y destino.

En el primer tipo de pruebas, se obtiene que cuando se maximiza la ganancia para el operador la ruta pasa por zonas de gran afluencia de público, para luego tomar el menor camino a su destino, lo que la transforma en una muy buena elección para el operador. En cambio, cuando se maximiza el costo del usuario, como éste es negativo, la maximización hace tender los valores a cero, lo cual se logra disminuyendo los tiempos (de acceso, de espera, de viaje), lo que es una situación esperada. Pero también elige rutas que tienen una afluencia de usuarios muy baja o nula, lo cual es una situación indeseable porque disminuye los costos disminuyendo los usuarios lo cual no es obviamente el objetivo de la línea. Esto ocurre porque no se considera el ingreso del operador. Esto puede ser solucionado manteniendo la afluencia de público fija, o modificando la función objetivo.

Para el segundo tipo de pruebas, cuando se beneficia sólo el operador, se obtienen rutas un poco más largas, y por ende demora unos minutos más en llegar al destino, pero que pasa por lugares de gran afluencia de público lo cual permite duplicar el ingreso del operador. Por otro lado, al considerar el costo usuario, los beneficios para el operador siguen siendo similares, pero la ruta encontrada es más corta con menor tiempo de viaje. Ahora bien, si no se considera el beneficio del operador, al igual que en el caso anterior busca rutas con menor afluencia de público.

5. Conclusiones

Al favorecer el beneficio del operador de la línea de transporte, se obtienen rutas más extensas, que invierten un poco más de tiempo, pero pasan por los lugares de mayor afluencia de pasajeros aumentando de manera considerable los ingresos del operador.

No ocurre lo mismo cuando se favorece el beneficio a los usuarios de la línea de transporte, se determina un error en la función objetivo que pondera de la misma forma la disminución de los tiempos con la disminución de la afluencia.

Una proposición consiste en evaluar el sistema completo de acuerdo a:

$$FO = \alpha \sum_{L=1}^{n+1} (IO_L - CO_L) - \beta \sum_{L=1}^{n+1} CU_L$$

con n : número de líneas de transporte en funcionamiento.

Además se debe realizar un re-cálculo de los valores de aptitud de todas las líneas, incluyendo la nueva, para que refleje la alteración que se produce en el sistema. Con esto se pretende encontrar la ruta que minimice el tiempo total de viaje del sistema con el menor efecto posible sobre la afluencia de viajes captados.

Las principales dificultades radican en el modelamiento de la ciudad y la representación de las rutas. Esto debido a que los estudios de planificación vial efectuados a ciudades son, por lo general, a nivel estratégico (macromodelación), es decir, realizando una abstracción de las particularidades que ocurren a niveles de detalle más precisos.

Cuando se requiere realizar la micromodelación (demanda a nivel de calles), se encuentran nodos compartidos entre zonas, en cuyo caso no es posible definir efectivamente la zona a la que el nodo pertenece; luego al momento de distribuir la generación-atracción de los viajes a nodos, éstos almacenan demanda de todas las zonas a las cuales pertenecen. Además, en una situación real cada nodo tiene asignada una importancia única y diferente del resto que conforma una zona; sin embargo en la micromodelación se homogenizan estas características dentro de la zona. Para lograr resultados más precisos en este aspecto, se recomienda tratar cada nodo en forma individual, indicando su proporción generación-atracción de viajes o bien, analizar la pertinencia de capturar los datos de una forma que sea coherente con una aplicación de este tipo.

En la representación de las rutas, debido a la baja conectividad de los nodos y a su poca participación en una ruta, las representaciones y operadores tradicionales producen que la gran mayoría de los nuevos individuos generados sean desconexos. Por lo tanto fue necesario adaptar al problema, tanto la representación de los individuos como los operadores genéticos.

Finalmente, una dificultad propia de los algoritmos genéticos, es que, sobre todo en rutas de gran extensión, se cae fácilmente en óptimos locales. Para solucionar esto, se permitió al usuario del sistema la modificación manual de rutas, permitiendo sintonizar de esta forma el proceso visualizando un objetivo global. Otra solución a este problema sería marcar como no válidas aquellas rutas que no contengan un nodo o grupo de nodos en particular, o eliminar internamente nodos por los cuales la ruta no debe pasar.

Agradecimientos

Trabajo financiado parcialmente con los aportes de FNDR 2000, Programa Universidades - Gobiernos Regionales y Proyecto de Investigación DIUC 201.093.006-1.0.

Referencias

- [1] Cohon, J. L. *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press. Londres, 1978.
- [2] Contreras, Ricardo. *Introducción a los Algoritmos Genéticos*. INFOUDA 2000, Copiapó, Chile, 2000.
- [3] Davis, Lawrence. *Handbook of Genetic Algorithms* Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [4] Goldberg, David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989.
- [5] Gruttner, Erich. *Determinación de recorridos óptimos de líneas de transporte utilizando algoritmos genéticos*. Memoria de Título, Ing. Civil Informática, U. de Concepción, 2002.
- [6] Medina, Josep R. *Algoritmos Genéticos para la Optimización de Redes de Distribución*. Universidad Politécnica de Valencia, España, 1999.
- [7] Michalewicz, Zbigniew. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer, Berlin, 1996.
- [8] Ortúzar, J.; Willumsen, L. *Modeling Transport*. Wiley, Chichester, 1994.