

Diseño de redes viales urbanas usando algoritmos genéticos

M. Angélica Pinninghoff J.*

Eduardo Matthews D. *

Héctor Díaz C. ♦

e-mail: mapinnin@inf.udec.cl

*** Departamento de Ingeniería Informática y Ciencias de Computación**

♦ Departamento de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Universidad de Concepción, Chile

Resumen.

Este artículo trata el problema del diseño óptimo de redes viales urbanas, el que es formulado como un problema de optimización, con restricciones asociadas a la red de transporte, más otras posibles condiciones de borde. Los objetivos considerados corresponden a la minimización tanto del costo de construcción de vías, o del mejoramiento de las vías existentes, como del tiempo total de viajes de los usuarios de la red. El problema se enfrenta utilizando algoritmos genéticos, obteniendo como producto un software que permite apoyar el diseño de redes de transporte urbano, de acuerdo a un conjunto de parámetros ingresados, para cualquier ciudad de tamaño medio.

Palabras clave: Redes de transporte, algoritmos genéticos, optimización.

1. Introducción.

Actualmente, el sistema de transporte urbano se enfrenta a un problema de envergadura que surge de la gran diferencia entre las tasas de crecimiento vehicular que utiliza las vías de transporte, frente a la tasa de crecimiento de la infraestructura vial, que es mucho menor, debido principalmente a razones de tipo económico y de restricciones de espacio. En consecuencia, para el mantenimiento y administración de vías urbanas es necesario poder optimizar la elección de las vías que es necesario construir o mejorar.

Es así como en las ciudades resulta necesario que exista una red de transporte tal que permita el desplazamiento de personas y vehículos de forma eficiente. El diseño de una red vial urbana es un problema de optimización, que busca minimizar el costo generalizado de viajes en la red de transporte, considerando múltiples variables tales como la topología de la red (que involucra número y localización de las intersecciones y de las vías que las unen), las características de las vías (capacidad, longitud, tiempos de viaje, tiempos de viaje a flujo libre, costos de operación y construcción) y las características de las intersecciones (a nivel o desnivel, existencia o no de semáforos).

El objetivo general del trabajo realizado se plantea como la búsqueda de una solución al problema del diseño óptimo de una red vial urbana, aplicando la técnica de los algoritmos genéticos. Para ello se formula el problema de optimización que permita encontrar la red vial que soporte el problema del transporte privado de un área urbana, incorporando diferentes restricciones tales como condicionantes urbanísticas y anchos máximos de faja. Los algoritmos genéticos se utilizan como base de un mecanismo simplificado de asignación a la red de transporte, considerando la evaluación de las funciones objetivo que se definen.

El método resultante es aplicado en la ciudad de Los Angeles (VIII Región) considerando el impacto de relajar algunas de las restricciones impuestas en las soluciones.

El presente artículo está estructurado de la siguiente forma. La sección 2 presenta una descripción general del problema junto con la formulación del mismo. Luego, en la sección 3 se muestra la visión global de la solución utilizando algoritmos genéticos. En la sección 4 se describen los aspectos relevantes considerados para la implementación del software y en la sección 5 se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 6 se discuten las conclusiones que se derivan del trabajo realizado.

2. Descripción y formulación del problema.

El proceso de planificación de transporte se lleva a cabo partiendo generalmente del sistema de transporte actual en un área determinada. Esta forma de operar permite establecer modelos que simplifican la realidad en función de ciertas variables, calibrando los mismos con los datos disponibles. El modelo clásico de transporte corresponde al modelo de las cuatro etapas [Ortúzar94], que está compuesto por cuatro submodelos los cuales reflejan las distintas etapas de la demanda y oferta de transporte, como se esquematiza en la figura 1. Generación y atracción de viajes, distribución de viajes y partición modal conforman la demanda de transporte, mientras que la etapa de asignación corresponde a la oferta de transporte. Para una descripción más detallada de los submodelos ver [Matthews03].

Una red de transporte urbano corresponde a un conjunto de vías que permiten desplazar bienes y personas dentro de un área geográfica. Para la representación de estas redes se utilizan grafos dirigidos. Así, en una red $G = (N, A)$, N representa el conjunto de puntos geográficos a considerar (normalmente intersecciones de vías, paraderos o algún otro punto de interés) y A representa el conjunto de secciones homogéneas de vía que permiten unir dos puntos de N . Cada $a \in A$ es un arco del digrafo que posee ciertas propiedades como longitud, costo y capacidad (cantidad máxima de vehículos en un período de tiempo).

El problema consiste en diseñar diversas redes de transporte urbano, sobre las cuales se asignará el transporte privado. Posteriormente, cada una de estas redes de transporte con sus respectivos flujos vehiculares serán evaluados mediante una función objetivo cuya finalidad es permitir la elección de las alternativas que minimicen el tiempo total de viaje de los usuarios.

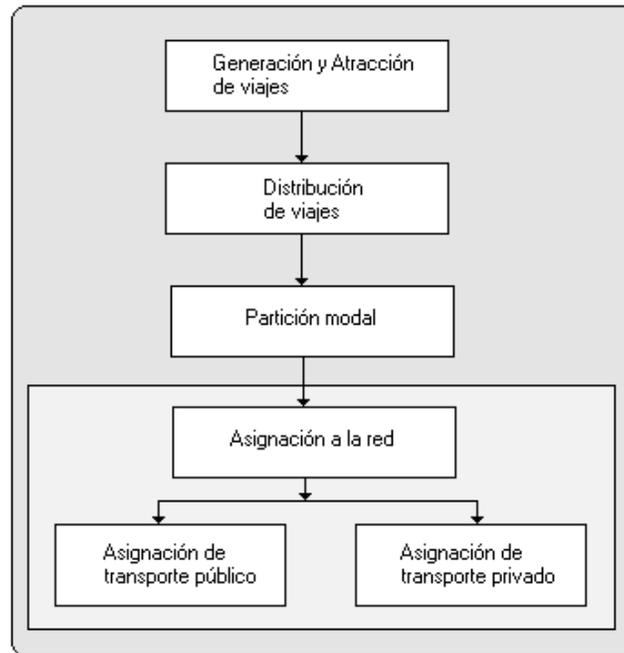


Figura 1. Modelo clásico de transporte

En la formulación matemática del problema se presenta la función objetivo, dentro de la cual interactúa la función *óptimo del sistema* y la función del costo de construcción.

El óptimo del sistema de transporte busca que el tiempo total de todos los usuarios de la red sea mínimo. El mínimo tiempo total de los usuarios de la red T , se determina a través de:

$$\text{mín } T = \sum_{a \in A} x_a \cdot t_a(x_a)$$

sujeto a: $\sum_k x_k^{rs} = q^{rs}, \forall r, s; x_a \geq 0, t_a \geq 0$

donde:

x_a : es el flujo de viajes en el arco a

x_k^{rs} : es el flujo en la ruta k con origen en r y destino en s

q^{rs} : es el flujo total entre el origen r y el destino s

t_a : es el tiempo de viaje en el arco a

El costo de construcción de un arco está dado por

$$c_a = \text{mín } \sum_{a \in A} \theta \cdot l_a \cdot p_a$$

donde:

l_a : es la longitud del arco a

p_a : es el número de pistas a construir o mejorar en el arco a . El valor de p_a es discreto

θ : es un conversor de unidades de medida

Finalmente, la función objetivo corresponde a:

$$\text{mín } \sum_{a \in A} (x_a \cdot t_a(x_a) + c_a) \quad (1)$$

3. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son técnicas que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización, inspirados en los procesos de selección natural de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de selección y supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin. Por imitación de este proceso, los algoritmos genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos para el problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas y del diseño del algoritmo genético. Los principios básicos de los algoritmos genéticos fueron establecidos por John Holland [Holland92] y se encuentran buenas descripciones en diferentes textos [Goldberg89], [Davis91], [Michalewicz92] y [Reeves93].

Una definición bastante completa para un algoritmo genético es la dada por John Koza [Koza92]: El algoritmo genético es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto (población) de objetos matemáticos individuales, cada uno de los cuales se asocia con una aptitud, en una población nueva, es decir en la siguiente generación, usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas en las que destaca la recombinación sexual. Los objetos matemáticos corresponden a individuos de la población, los cuales típicamente son cadenas de longitud fija que se ajustan al modelo de las cadenas de cromosomas.

La estructura general de un algoritmo genético, lo que suele denominarse su forma canónica, puede ilustrarse según el siguiente segmento de pseudocódigo [Buckless92].

Algoritmo Genético Simple

Begin

t := 0

Inicializar P(t)

Evaluar P(t)

Mientras no sea condición de término, repetir

t := t + 1

Seleccionar P(t) a partir de P(t - 1)

Aplicar Cruzamiento y Mutación sobre P(t)

Evaluar P(t)

End

Donde P(t) es la población de individuos en la generación t; Cruzamiento y Mutación son operadores genéticos que permiten recombinar la información contenida en los cromosomas.

En el trabajo con algoritmos genéticos, se necesita una codificación o representación del problema que resulte adecuada al mismo. Además se requiere una función de evaluación o de adaptación al problema, la cual asigna un valor a cada posible solución codificada indicando la bondad de la solución.

Durante la ejecución del algoritmo, los padres deben ser seleccionados para la reproducción o intercambio genético lo que producirá nuevos *hijos* o soluciones, a los cuales, con cierta probabilidad, se les aplicará una mutación. El resultado de la combinación de los pasos anteriores será un conjunto de individuos, posibles soluciones al problema, los cuales pasarán a formar parte de la siguiente generación.

Características que presentan los algoritmos genéticos.

Algunas de las características que presentan los algoritmos genéticos, en comparación con otras técnicas de solución de problemas, son:

Ventajas:

- No se requieren conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver.

- Operan en forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar secuencialmente como las técnicas tradicionales.
- Cuando se usan para problemas de optimización resultan menos afectados por los mínimos locales que cuando se emplean técnicas más tradicionales.
- Resultan fáciles de ejecutar en arquitecturas modernas con paralelismo masivo [Srinivas94]
- Usan operadores probabilísticos en vez de los típicos operadores determinísticos de otras técnicas.

Desventajas:

- Pueden tardar mucho en alcanzar la convergencia, o no llegar a converger en absoluto, dependiendo en cierta medida de los parámetros que se utilicen, el tamaño de la población, el número de generaciones, etc.
- Pueden llegar a una convergencia prematura debido a un conjunto de problemas de diversa índole, como mala elección de los operadores genéticos o los porcentajes probables de cruzamiento y/o mutación entre otros.

Por otra parte, es recomendable que el problema a tratar presente las siguientes características:

- Su espacio de búsqueda (es decir sus posibles soluciones) debe estar definido dentro de un cierto rango acotado.
- Debe ser posible definir una función de aptitud que entregue una indicación sobre qué tan buena o mala es una cierta solución.
- Las soluciones deben codificarse de una manera que resulte fácil de implementar en un computador.

Habiendo determinado que el problema planteado cumple con estas condiciones y teniendo en cuenta que ésta es una técnica de probada capacidad para la resolución de problemas complejos, se ha decidido utilizar a los algoritmos genéticos como parte constituyente de la solución a implementar.

4. Consideraciones de implementación

A continuación, se presentan algunas definiciones fundamentales en el contexto del problema a resolver:

- *Solución*: Corresponde a una red de transporte urbano.
- *Individuo o cromosoma*: Corresponde a una red de transporte o solución, codificada para poder ser utilizada por el algoritmo genético.
- *Alelo*: Corresponde a la unidad mínima de un cromosoma, es decir, el conjunto de todos los alelos constituye un cromosoma o individuo. Para el problema es un nodo o una arista de la red.
- *Población*: Corresponde a un número fijo de individuos que se mantiene constante a través de las generaciones.
- *Generación*: Corresponde a la evolución de una población desde un estado particular hasta el estado siguiente.
- *Función de Evaluación*: Corresponde a la función que se desea optimizar.

Para la representación de los individuos se utilizó un enfoque combinado de modo de representar cada alelo como una combinación de nodos y arcos. Esto para facilitar el almacenamiento y manejo de las soluciones válidas. El cromosoma se dividió en dos partes fijas: la primera parte contiene los nodos de la red formando una permutación de estos, de esta manera se representa una red con el mínimo de aristas para ser conexa; la segunda parte contiene aristas que conectan los nodos. Detalles del esquema utilizado se pueden encontrar en [Matthews03].

La Función de Evaluación utilizada para calcular la bondad de los individuos, corresponde a la función de transporte urbano (1), que fue presentada en la sección 2 de este artículo. Dentro del diseño de la función de evaluación se debe elegir qué método de aproximación al problema de Equilibrio de Usuarios (asignación de flujos de viajes) se utilizará, optándose por un método conocido como *Algoritmo de Frank-Wolfe* [Matthews03]. Este es un método de combinación convexa que se elige por sobre un método heurístico, debido a su menor tiempo de convergencia. Para la obtención de los flujos vehiculares en equilibrio, utilizando el algoritmo de Frank-Wolfe, se emplea el software *Saturn*, que es un programa flexible para el análisis de redes desarrollado por el *Institute for Transport Studies*, en la Universidad de Leeds, Inglaterra.

La etapa de creación de la población inicial consiste en la generación de diversas redes de transporte con el fin de obtener una gama amplia y diversa de soluciones factibles. A fin de generar solamente redes conexas, en una primera fase se forma una red conexa mínima (primera parte del cromosoma), a la que luego se agregan arcos (segunda parte del cromosoma) de forma que la red de transporte obtenida posea las características propias de una red urbana vial.

En cuanto a los operadores genéticos, la selección de individuos se realiza utilizando la *ruleta*, que consiste en simular una rueda de ruleta asignando a cada individuo una porción de la rueda proporcional a su aptitud; debido a su implementación sencilla y a su demostrada eficacia. Para el cruzamiento se utiliza el operador PMX [Murata97] para la primera parte del cromosoma, ya que este es un operador sobre permutaciones que produce permutaciones y genera resultados mejores que otros cruzamientos estudiados; para la segunda parte del cromosoma se usa el operador de cruzamiento simple. La mutación utiliza el criterio presentado en [DeJong75], donde se recomienda una probabilidad de mutación dada por L^{-1} , en que L es la longitud del cromosoma. El operador de mutación usado para la primera parte del cromosoma consiste en un intercambio de dos alelos, a fin, para la segunda parte del cromosoma se modifica el valor de un alelo elegido al azar.

5. Resultados

El software desarrollado se sometió a un conjunto de pruebas sobre un modelo real correspondiente a la ciudad de Los Angeles, una ciudad de la octava región en Chile con alrededor de 120.000 habitantes. La ciudad se dividió en 48 zonas, las cuales se agruparon además en macrozonas que corresponden a Sector Norte, Sector Centro, Sector Centro-Oriente, Sector Sur, Sector Oriente, Sector Sur-Poniente y Sector Poniente, lo que se puede ver en la figura 2. Tanto los nodos como los arcos tienen representación física real, por lo que no existen componentes geográficos ficticios en el modelo. La mayoría de los nodos corresponden a una intersección o cruce, mientras que los arcos corresponden a la red vial.



Figura 2. Zonificación de la ciudad de Los Angeles

Los análisis realizados consideran los diferentes escenarios formulados y aprobados por el Comité de Uso de Suelo y Proyectos, la subdivisión de la ciudad en zonas que consideran pares origen-destino permite reflejar de manera más fina las variaciones que experimentará la ciudad, desde el punto de vista del transporte, en los períodos considerados.

La figura 3 muestra la tabla resumen de resultados obtenidos considerando los datos proyectados para el año 2010.

Tamaño de la Población	25	50	75
Mejor Aptitud Inicial	12.424,36	13.610,91	20.239,77
Mejor Aptitud Final	8.790,88	8.673,29	7.973,06
Tiempo Medio (minutos)	4:14	15:18	38:48
Número de Iteraciones	460	520	656
Mejora Respecto Inicio	29,2%	36,2%	60,6%
Mejora Respecto Actual	76,4%	76,7%	78,6%

Figura 3. Resultados para el año 2010

Los datos utilizados en las pruebas corresponden a las matrices de viajes de la ciudad de Los Angeles de los años 2000 y 2010, considerando el periodo de punta matutino. Si bien las pruebas no llegaron a la obtención de una red única, queda claramente demostrada la insuficiencia en la infraestructura vial desde las macrozonas Poniente y Norte hacia la macrozona Centro. Pese a no obtenerse la red única, se obtiene de acuerdo a las mediciones una mejora promedio en la red de un 23,9%, que no es un porcentaje significativo, pero que puede explicarse por el hecho de que el modelo de red para el año 2000 no presenta una gran congestión vehicular.

La figura 4, a continuación, muestra una de las pantallas que el software ofrece al usuario.

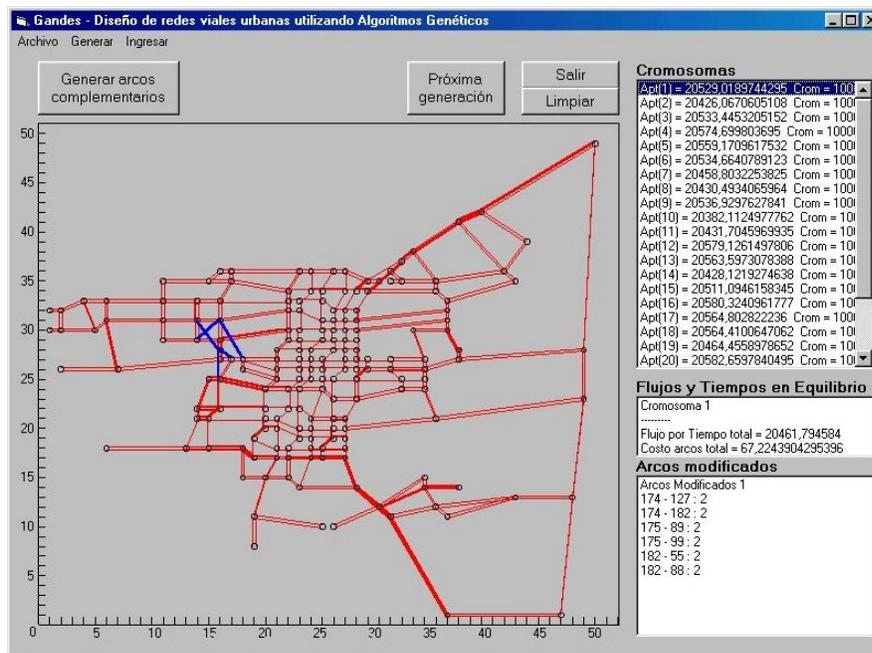


Figura 4. Pantalla de salida del software

Por otra parte, los experimentos mostraron que de mantenerse la red vial urbana tal como está, el año 2010 existirá una insuficiencia de infraestructura importante. En particular se detecta que es necesario ampliar o generar nuevas vías desde las macrozonas Poniente y Norte hacia la macrozona Centro, ya que se aprecia una gran generación de viajes en ambas macrozonas origen con una gran atracción en la macrozona Centro. Esto resulta natural, ya que los problemas detectados con la matriz correspondiente al año 2000 son menos críticos que los problemas detectados con la matriz del año 2010. Otros sectores afectados por la insuficiente infraestructura vial son la macrozona Centro y la conexión entre la macrozona Centro-Oriente (generadora de viajes) y la macrozona Centro (atractora). Para todos los casos el software desarrollado propone soluciones viales que incluyen el mejoramiento de vías existentes y la creación de vías nuevas. Sobre las proyecciones existentes para el año 2010, el software sugiere modificaciones que llegan a mejoras superiores al 76% en la red de transporte con respecto a la planificación actual. Este porcentaje, superior al obtenido para el análisis con datos del año 2000, se debe a que para el año 2010 se espera una congestión vehicular importante.

6. Conclusiones

El software desarrollado representa un elemento de apoyo en la planificación urbana, operando en una primera familia de pruebas como un mecanismo de detección de deficiencias de infraestructura, aunque se produce un aumento importante en los tiempos de ejecución a medida que se aumenta la cantidad de generaciones consideradas.

En una segunda familia de pruebas, aunque se estima que es posible llegar a obtener una *red óptima*, se requiere de tiempos de ejecución bastante prolongados y por tal razón se sugiere que se enfrente estas pruebas con una filosofía diferente, lo que tal vez deba considerar la opción del paralelismo.

Un resultado interesante apunta a que el software tiende a construir diagonales entre zonas o nodos donde hay una deficiencia de infraestructura vial. Por tal motivo, resultó necesario incorporar el concepto de zonas restringidas, es decir aquellos casos en que el software está impedido de generar nuevos arcos (nuevas vías), pudiendo solamente mejorar los arcos existentes (por ejemplo, aumentando el número de pistas). Las zonas restringidas son definidas por el usuario. La sugerencia de construir diagonales, más que el diseño de la vía en sí, demuestra la existencia de una necesidad en cuanto a interconectar nodos origen y destino con algún diseño, y es aquí donde un experto en el tema podría apoyarse en el uso de este sistema para poder decidir de entre un conjunto de alternativas viables.

Adicionalmente, se ha demostrado la utilidad del uso de los algoritmos genéticos como un mecanismo de apoyo al diseño de redes de transporte, ya que sirve para automatizar procesos de detección de insuficiencias en la infraestructura vial en sectores de una ciudad, aunque se requiere de algunos esfuerzos adicionales para manejar los tiempos de ejecución extensos que podrían conducir a la obtención de redes óptimas.

Sobre la relajación de algunas de las condiciones impuestas al software, la más importante resultó ser la eliminación del costo de la construcción de un nuevo arco (vía) sobre la red. Lo que ocurrió fue un aumento importante en la cantidad de nuevas vías sugeridas, lo que llevaba a una minimización del tiempo total en la red. Sin embargo, estas soluciones tenían implícito un alto costo asociado a la construcción de vías nuevas. Adicionalmente se realizó un conjunto de pruebas con variaciones importantes en los tamaños de las poblaciones y en las matrices de viajes consideradas, lo que llevó de forma sostenida a aumentos en los tiempos de ejecución cada vez que se producía un aumento en los elementos bajo análisis.

Por último, con respecto a las sugerencias que el software hace respecto al mejoramiento de vías, existe una coincidencia bastante importante con los planes actualmente existentes para el mejoramiento futuro de la red vial de la ciudad de Los Angeles. Aunque esto es satisfactorio desde un cierto punto de vista, también resulta natural, dado que los criterios para la evaluación de las soluciones son idénticos. En ese sentido, y sobre la base del uso de los criterios correctos, el software es una demostración de que las soluciones de mejoramiento sugeridas son adecuadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por el proyecto DIUC 201.093.006-1.0.

Referencias

- [Buckless92] Buckless, H.P., Petri, F.E. *Genetic Algorithms*. IEEE Computer Society Press, 1992
- [Davis91] Davis, L. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold Library, 1991
- [DeJong75] De Jong, K. *An Analysis of the Behaviour of a Class of Genetic Adaptive Systems*. University of Michigan, 1975
- [Goldberg89] Goldberg, D. *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, 1989

- [Holland92] Holland, J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The MIT Press, 1992
- [Koza92] Koza, J. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, Mass. The MIT Press, 1992
- [Matthews03] Matthews, E. *Diseño Optimo de Redes Urbanas Utilizando Algoritmos Genéticos*. Memoria de Título Ingeniero Civil Informático, Universidad de Concepción, Chile, 2003
- [Michalewicz92] Michalewicz, Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutionary Programs*. Springer, 1992
- [Murata97] Murata, T. *Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization*. Osaka Prefecture University, Japan, February, 1997
- [Ortúzar94] Ortúzar, J. *Modelos de Demanda de Transporte*. Ediciones Universidad Católica de Chile, 1994
- [Reeves93] Reeves, C. *Modern Heuristics Techniques for Combinatorial Problems*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993
- [Srinivas94] Srinivas, M., Patnaik, L. *Genetic Algorithms: A Survey*. IEEE Computer, June, 1994