

Aplicación de técnicas metaheurísticas a un problema de diseño de rutas de reparto en Galicia

José A. Comesaña Benavides

Dpto. de Organización de Empresas y Marketing, Área de Organización de Empresas. E.T.S. de Ingenieros Industriales. Universidad de Vigo. Calle Maxwell, 9 36310. Vigo. comesana@uvigo.es

Resumen

La presente comunicación presenta el trabajo realizado en el desarrollo de una herramienta informática para el diseño de rutas de reparto a lo largo de una geografía dada y mediante unos determinados vehículos, buscando minimizar el número de kilómetros recorridos, pero de modo que la carga de cada camión no rebase nunca su capacidad. Se logra un modelo de optimización que permite gestionar y racionalizar las actividades de reparto de una forma ágil y automática, sin necesidad de que un operador humano aporte su know-how en cada ocasión en que sea necesario efectuar los cálculos.

Para el citado desarrollo se ha utilizado la herramienta MATLAB, mediante la cual se han combinado algoritmos tradicionales, tales como el algoritmo de Dijkstra con algoritmos genéticos, tanto para el cálculo de p -medianas como para la resolución de pequeños problemas TSP que van apareciendo durante el proceso

Palabras clave: Técnicas metaheurísticas, Algoritmos genéticos, Travelling Salesman Problem, Rutas de reparto

1. Introducción

El transporte es la actividad que posibilita el movimiento de personas y/o mercancías, motivo por el cual representa un eslabón imprescindible para evitar pérdidas de competitividad en el mercado. Su objetivo principal es colocar los productos de la empresa en el lugar en que se demandan, en el menor tiempo y al menor coste posible. Esto es especialmente importante en el caso de productos perecederos o en los casos en que se trabaje según una filosofía Just in Time. Por su lado, los consumidores demandan también servicios de transporte con un bajo coste, tanto monetario como temporal. Cuanto menores sean esos costes mayores serán la renta y el tiempo que el individuo podrá dedicar a consumir otros bienes o servicios. El sistema de transporte debe ser, pues, óptimo para repercutir sobre la eficiencia y la competitividad económica.

Los cambios aparecidos en el entorno productivo en los últimos años, tales como la implantación de sistemas de producción tipo *pull*, la especialización e internacionalización de la producción, la fuerte tendencia a la externalización, etc. tienen repercusión directa sobre el transporte.

Por otra parte, un aspecto fundamental a considerar es la introducción de nuevas tecnologías, siendo la informática una poderosa herramienta de trabajo que debe facilitar la simplificación

de las tareas y agilizar la toma de decisiones. En el campo que estamos estudiando, el del transporte, los sistemas informáticos trabajarán a partir de los datos relativos a las entregas a efectuar, al parque de vehículos disponible, la jornada laboral de los conductores, el horario de recepción de pedidos y todos los demás datos disponibles e intentarán minimizar los costes de distribución, buscando que los vehículos recorran el mínimo número de kilómetros posible, o bien aumentando el nivel de servicio por medio de la disminución del tiempo de reparto, favoreciendo así el cumplimiento de horarios previamente acordados con el cliente, por ejemplo.

Del mismo modo, el campo de actuación de estos sistemas de optimización de rutas no tiene por qué limitarse a aspectos operativos diarios, sino que también pueden ser de gran ayuda en aspectos más estratégicos, como por ejemplo:

- Optimización de los vehículos utilizados para el reparto, tanto en número como en tamaño.
- Estudio de la posibilidad de transformar las rutas fijas existentes en rutas optimizadas diariamente, en función de los pedidos del momento.
- Revisión de la frecuencia de entrega a los clientes y de los días de reparto estipulados.
- Estudio de utilización de flota propia o subcontratada.
- Revisión del número y localización de los almacenes.
- Incremento de la colaboración entre fabricantes y distribuidores.

En las últimas décadas han ganado protagonismo nuevas técnicas cuantitativas de resolución de problemas, tales como las Redes Neuronales o los Algoritmos Genéticos, que se conocen como técnicas metaheurísticas y que son, al igual que las técnicas heurísticas, métodos aproximados de cálculo, que buscan una solución válida tanto en precisión como en consumo de recursos necesarios para su obtención. Pero, al contrario que las heurísticas, las técnicas metaheurísticas no son una técnica concreta, sino más bien un patrón a seguir, unos esquemas de resolución inspirados normalmente en comportamientos ajenos al ámbito concreto de aplicación. Así por ejemplo, las Redes Neuronales se inspiran en la forma de almacenar y procesar la información de las neuronas en el cerebro y los Algoritmos Genéticos en la forma en que por selección natural se va mejorando la adaptación de las especies al medio.

En esta comunicación se presenta una aplicación de técnicas de Algoritmos Genéticos hibridadas con otros procedimientos en un caso de diseño y optimización de rutas para el reparto de mercancías en una serie de ciudades interconectadas a través de una red de carreteras. Para ello se aplican en primer lugar una serie de algoritmos específicos para el tipo de problema en cuestión. Se parte de un problema simple para ir añadiendo nuevas restricciones a medida que se avanza.

2. Descripción del problema a abordar

La planificación de rutas de distribución consiste en establecer los caminos que deben seguir los vehículos de la empresa para atender (entregar y recoger mercancías) a unos clientes con

demandas y localizaciones conocidas, a partir de uno o más puntos de origen (fábrica y almacenes, principalmente), mediante vehículos de capacidades conocidas.

Las empresas de distribución o de producción se encuentran a menudo con el problema de diseño de las rutas, en el cual hoy, pese a los avances experimentados en los últimos años, queda por delante un importante margen para la reducción de costes. Para ello será necesario determinar las trayectorias que deben seguir los vehículos para servir los pedidos existentes, teniendo en cuenta la flota y la mano de obra disponibles.

Este trabajo está especialmente orientado a la optimización de las rutas de horizonte diario, donde cada día se planificarán las rutas en función de las demandas concretas de los clientes. Para llevarlo a cabo se escogió la geografía gallega, con demandas en diversa ciudades, si bien esto no es impedimento para ampliar o reducir el horizonte geográfico a cualquier otro que se considere oportuno.

Con respecto al objetivo a minimizar, puede variar en función de la empresa y de las peculiaridades propias de su entorno. Así, puede desearse minimizar el número total de vehículos empleados, la distancia recorrida, el tiempo empleado para el reparto, o cualquier combinación de los factores anteriores u otros distintos. En este caso concreto, se ha trabajado con el objetivo de minimizar el número de kilómetros necesarios para servir unos pedidos determinados respetando unas características de la flota fijadas de antemano.

2.1. Travelling Salesman Problem

Uno de los problemas más conocidos y estudiados es el llamado Problema del Viajante de Comercio (Travelling Salesman Problem, en adelante TSP). Consiste, dado un conjunto de ciudades y el coste de desplazamiento entre cada par de ellas –normalmente la distancia- en determinar la manera en que el viajante debe visitarlas todas una y sólo una vez, y regresar al punto de partida de la manera más económica. En otras palabras, se trata de encontrar el mínimo Ciclo Hamiltoniano en un grafo completo de N nudos.

El TSP más sencillo es aquél en el que las distancias son simétricas, es decir, que el coste de viajar de una ciudad x a otra y es igual que el coste del camino inverso.

Su formulación matemática viene dada por:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ & \text{sujeto a} \\ & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, N; j \neq i \\ & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N; i \neq j \\ & x_{ij} = \{0, 1\} \end{aligned}$$

donde

c_{ij} = distancia o coste de ir desde la ciudad i a la ciudad j

N = número de ciudades a visitar

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{si no se utiliza el camino } (i,j) \\ 1, & \text{si se utiliza el camino } (i,j) \end{cases}$$

La primera de las condiciones asegura la circunstancia de que todas las ciudades son puntos de llegada una sola vez, mientras que la segunda asegura que todas las ciudades son puntos de salida también una única vez.

Normalmente, los costes c_{ij} son las distancias euclídeas entre los dos puntos i y j

$$c_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

siendo (X_i, Y_i) y (X_j, Y_j) las coordenadas euclídeas respectivas de i y j .

No obstante, este problema así descrito no tiene demasiada aplicación. En la realidad, hay múltiples condicionantes que se deben considerar. Los más importantes, desde el punto de vista del problema que nos ocupa, son los siguientes:

- Existencia de varios vehículos
- Existencia de varios puntos de partida posibles
- Existencia de limitaciones relativas a las rutas
- Existencia de limitaciones relativas a los clientes

2.2. Datos utilizados

Por lo que respecta a los datos precisos para la programación del reparto de mercancías, estableceremos las siguientes categorías:

- Información sobre la red viaria
- Tipos de carreteras
- Número de kilómetros entre destinos

Este es uno de los principales problemas a la hora de planificar rutas de distribución, pues debe conocerse la distancia entre cada par de puntos, y su cálculo se complica a medida que aumenta el número de clientes N , puesto que el número de distancias a obtener es $N * (N-1)/2$. Una de las técnicas más utilizadas para solventar esto consistía en calcular las distancias euclídeas y luego multiplicar por un factor de corrección aproximado mayor que la unidad (por ejemplo 1,2). No obstante, en este caso se ha trabajado con una base de datos que aportaba solamente las distancias entre ciudades contiguas y a partir de ahí, mediante otro algoritmo (Dijkstra) se calcularon las distancias entre cada par de ciudades posible. Este método permite

también calcular el peaje o bien el tiempo aproximado (teniendo en cuenta velocidad media y distancia) entre todo par de ciudades

- Peajes
- Velocidades máximas permitidas
 - Base de datos de vehículos
- Capacidades
- Costes
 - Base de datos de clientes
- Ventanas temporales de servicio
- Vehículos admisibles
- Demandas de los clientes para el período de tiempo considerado
 - Otros datos generales
- Regulaciones laborales de los conductores
- Polivalencia de los conductores para manejar cada vehículo

3. Resolución del problema

La tarea de resolver el problema descrito se ha dividido en varios pasos, a cada uno de los cuales se le ha aplicado una técnica propia, que son los siguientes:

- Un algoritmo de Dijkstra clásico para la obtención de las distancias y rutas de coste mínimo entre todo par de puntos.
- Un algoritmo genético de cálculo de p-medianas para la división de la región en sectores según el número de vehículos.
- Un algoritmo de asignación para las asignaciones de ciudades a cada uno de los sectores.
- Finalmente, un algoritmo genético de resolución del problema TSP para la obtención de las rutas en los sectores, utilizando la función de evaluación de fitness de Mayerle.

Además, para que la aplicación sea lo más amigable posible y no se requieran grandes conocimientos para su uso, se ha dotado al sistema de un grupo de pantallas que van guiando al usuario por todos los pasos y presentándole diversos resultados obtenidos, tanto la distribución de las rutas que se representa gráficamente sobre un mapa como la evolución del fitness de las soluciones y otros datos de interés.

A la hora de escoger el software para desarrollar el presente trabajo, se partió de la premisa de que éste iba a ser un medio y no un fin en sí mismo, por lo cual se buscó un programa “sencillo” de utilizar, que permitiese un aprendizaje rápido. Se eligió Matlab porque se consideró que cumplía bien ese requisito. En concreto, los motivos por los que se tomó esta decisión fueron los siguientes:

- **Reutilización de código:** Este es, posiblemente, el aspecto más importante. Matlab tiene integradas funciones para el trabajo con matrices (operaciones algebraicas, transformaciones, factorizaciones...) que evitan tener que programar y verificar algo que ya está hecho. Otro ejemplo son los grafos (gplot), también integrados en Matlab.
- **Sencillo:** evita que haya que preocuparse de gestionar la memoria, no es un lenguaje que obligue a definir los tipos de datos, es rápido de aprender, etc.
- La **visualización de imágenes** con Matlab es muy fácil, y su manipulación y transformación también.
- **Adecuación al campo de trabajo:** Matlab se adecúa especialmente bien a trabajos como este, que son complejos matemáticamente, y no necesitan unas interfaces de usuario sofisticadas. Lo que importa es el cálculo y los resultados.
- **Bien documentado:** El propio Matlab y sus toolboxes tienen una muy buena documentación, que ayuda a desarrollar el trabajo a partir de los ejemplos que allí se muestran. Además, existen también multitud de manuales que se pueden conseguir cómodamente (por ejemplo, en Internet o en bibliotecas).
- **Arquitectura abierta y extensible:** Matlab permite la interacción con Excel, C, Fortran y otras aplicaciones externas muy utilizadas.

A continuación se expondrán los dos subproblemas en los que se han utilizado algoritmos genéticos, puesto que los dos restantes (algoritmo de Dijkstra y algoritmo de asignación) son sobradamente conocidos.

3.1. Algoritmo Genético para el problema de las p -medianas

El problema de las p -medianas proporcionará p puntos notables, que representarán depósitos ficticios. A cada uno de estos depósitos se les asignarán posteriormente sus vértices correspondientes, formando así p conjuntos iniciales. Finalmente, será en estos conjuntos donde se aplique otro algoritmo genético, en este caso el del problema de viajante de comercio (TSP), que dará lugar a las rutas definitivas. En el caso de estudio que nos ocupa, no se pretenden definir nuevos centros de distribución o puntos de tránsito reales, sino que este algoritmo se usará para dividir el conjunto total de ciudades en tantos sectores como vehículos de los que se disponga. Las medianas calculadas son por ello ficticias y posteriormente se tendrá en cuenta el coste de traslado desde el almacén real hasta ellas.

En los problemas de localización de medianas se busca minimizar la suma de todas las menores distancias de la instalación que se va a localizar a los vértices de un grafo. Son problemas de localización de suma mínima. En la figura 1 se muestra un gráfico ilustrativo.

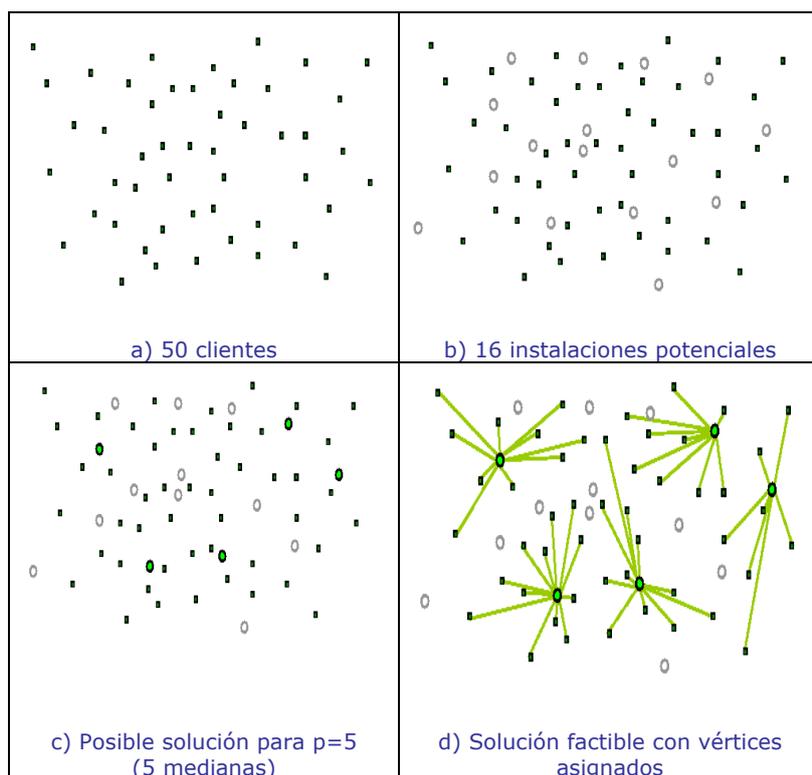


Figura 1. Selección de los vértices del grafo

En esta parte del trabajo no se ha hecho distinción entre clientes y posibles medianas, por lo que una misma ciudad puede ser a la vez un punto a servir, con demanda para satisfacer y un depósito, con una capacidad. Cada uno de los cromosomas iniciales serán entonces subconjuntos de las ciudades donde se encuentran los clientes de la empresa. El número de cromosomas que se generarán se definió por defecto como 100, ya que según los trabajos de Goldberg (1989), lo habitual para este tipo de problemas es trabajar con una cantidad de individuos comprendida entre 50 y 100. No obstante, esta parámetro se puede variar en el “modo avanzado” de la interfaz de usuario.

Otro aspecto que fue preciso definir antes de comenzar fue el tamaño de los cromosomas. En nuestro caso, venía definido por el número de vehículos disponible, ya que cada uno de los genes será en potencia una de las medianas o inicio de ruta a servir por cada vehículo. En nuestro caso, y solamente a título de ejemplo, se tomó una empresa con 6 vehículos para servir a toda la geografía objetivo.

Por lo que respecta a la función de fitness, se ha utilizado el inverso de la suma de las distancias entre cada una de las ciudades y su mediana más próxima, teniendo en cuenta la importancia relativa de la ciudad concreta.

Como función de selección se ha utilizado la función de Mayerle (1994) y como operador de cruce, un sorteo aleatorio para decidir qué elementos de cada pareja de cromosomas se

intercambian. Evidentemente, es necesario utilizar una operación de reparación para asegurar que los nuevos cromosomas obtenidos siguen siendo válidos.

3.2. Algoritmo Genético de resolución del TSP

Como dato de entrada, este algoritmo recibe tantos grupos de ciudades como medianas para servirlos se hayan definido. Además, a partir de los pasos anteriores, se asegura que el vehículo asignado a un recorrido tiene capacidad suficiente para realizarlo. El algoritmo genético trabajará independiente para cada uno de esos grupos, es decir, que se lanzarán tantos algoritmos genéticos como medianas haya. En cada algoritmo, los cromosomas serán combinaciones factibles de las ciudades de uno de esos grupos.

La población inicial se genera mediante permutaciones aleatorias del cromosoma inicial. Como valor del fitness utilizaremos la distancia recorrida desde el punto definido como almacén central (que no tiene por qué pertenecer necesariamente al conjunto anterior) hasta el punto inicial del cromosoma y volver al mismo pasando por todos y cada uno de los puntos, en el orden marcado.

Como función de selección, al igual que en el algoritmo anterior de las p-medianas, se tomó la función de Mayerle, con la opción de utilizar la función de Mayerle Modificada mediante la inclusión de una raíz cúbica en lugar de la raíz cuadrada, lo que acentúa más el sesgo hacia los valores con mejor aptitud.

El cruce entre las parejas de cromosomas se realiza sorteando un número aleatorio por el que comenzar, que corresponderá a una ciudad de partida, y seleccionando a continuación las ciudades en función de su mayor proximidad a dicha ciudad. Este proceso lleva asociada la operación de reparación para asegurar la factibilidad de los cromosomas obtenidos.

En este caso, a diferencia del cálculo de las p-medianas, se incluyó el fenómeno de la mutación, que consiste aquí en la variación del punto inicial de la ruta dada por el cromosoma. La mutación se aplica aleatoriamente, un 1% de las veces.

El resultado del cruce, una vez reparado y tras la mutación (si corresponde aplicarla) se incluirá en el conjunto de los cromosomas iniciales, sustituyendo al peor de sus cromosomas.

4. Resultados obtenidos

Con el trabajo desarrollado se ha logrado un programa de sencillo manejo que con un tiempo de cálculo perfectamente asumible (que la mayor parte de las veces no sobrepasa los 3 segundos) proporciona unos resultados plenamente satisfactorios para el diseño diario de las rutas de reparto mediante interfaces amigables y muy intuitivas.

En el gráfico siguiente puede verse dos pantallas, la de la figura 2 se presenta al usuario antes de realizar el cálculo y la de la figura 3 después de realizarlo. Son pantallas de modo de usuario. Existe además un modo avanzado, que corresponde a la figura 4, en el que, entre otros valores, se puede seguir la evolución del fitness

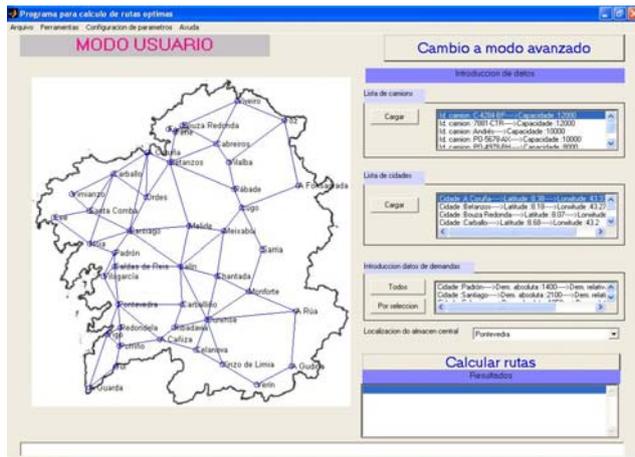


Figura 2. Pantalla antes del cálculo

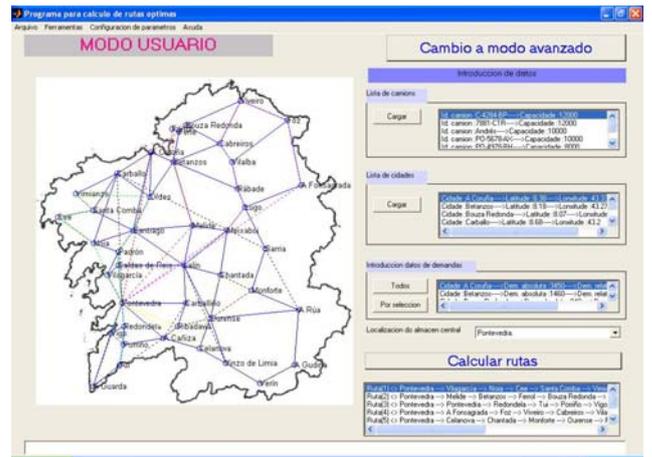


Figura 3. Pantalla después del cálculo

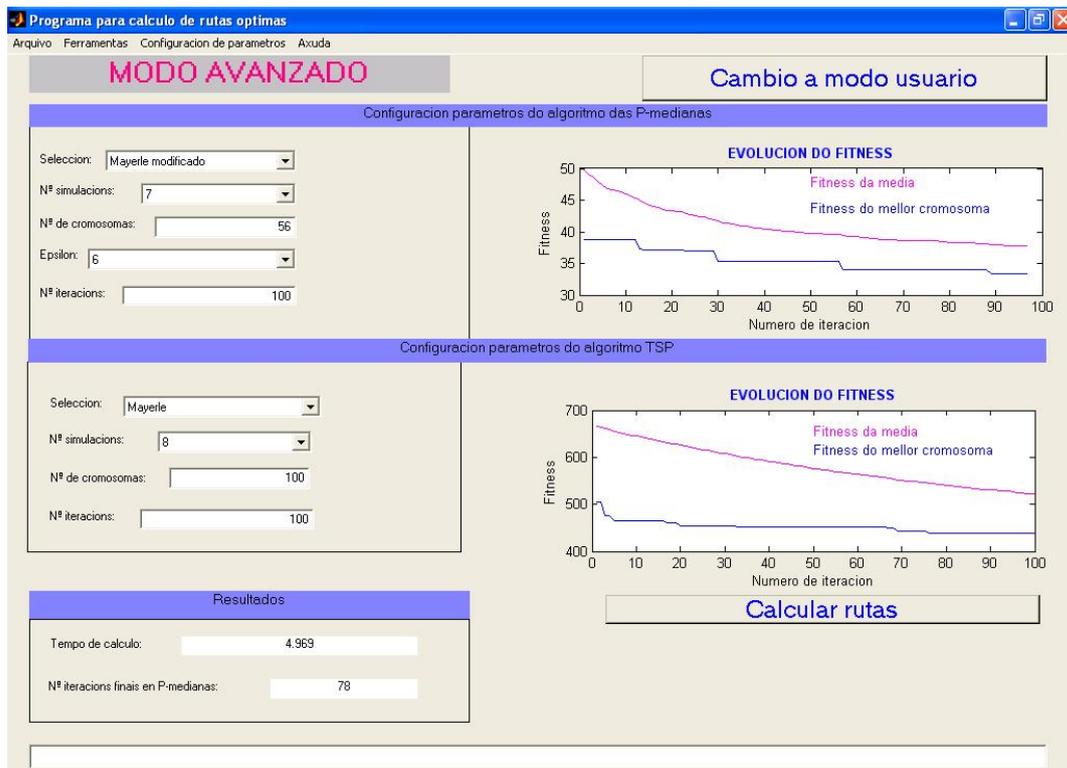


Figura 4. Modo avanzado, con evolución del fitness

5. Conclusiones

Con el trabajo realizado se ha desarrollado un sistema que permite realizar con gran facilidad un proceso complejo como es el cálculo de rutas sujeto a diversas restricciones, lo cual supone ya de por sí una importante ayuda en el trabajo operativo diario. Asimismo, el sistema

aporta una importante información para la planificación estratégica, ya que permite identificar rápidamente casos problemáticos, tales como la existencia de camiones sin asignar, y por lo tanto infrautilizados, o bien, una falta de capacidad de la flota para cubrir la demanda de los puntos a servir.

Como futuras líneas de investigación queda abierta la inclusión de otro tipo de restricciones que en este proyecto han quedado sin cubrir, como pueden ser las restricciones temporales o la búsqueda de trayectos que minimicen los costes de peajes, por ejemplo. Otros puntos abiertos a futuro desarrollo serían la opción de seleccionar más de un almacén central como puntos de origen de las cargas o bien la creación de un editor gráfico, en modo mapa, de la lista de ciudades.

Referencias

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, New York.

Mayerle, S.F. (1996). *Um algoritmo genético para o problema do caixeiro viajante*, Preprint, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.