

Sistema de apoyo en la toma de decisiones para el transporte de mercancías de larga distancia por medio de la optimización de colonia de hormigas

AN DECISION SUPPORT SYSTEM TO LONG HAUL FREIGHT TRANSPORTATION BY MEANS OF ANT COLONY OPTIMIZATION



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7190> | Recibido: 23/06/2014 • Aceptado: 14/11/2014

Juan-Antonio Sicilia-Montalvo¹, Beatriz Royo-Agustín², Carlos Quemada-Mayoral³, María-José Oliveros-Colay², Emilio Larrodé-Pellicer²

¹ Universidad Internacional de La Rioja. Gran Vía Rey Juan Carlos I, 41 – 26002 Logroño (La Rioja). Tfno: 941 210211. juanantonio.sicilia@unir.net

² Universidad de Zaragoza. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Calle María Luna, s/n – 50018 Zaragoza.

³ Virginia Polytechnic Institute and State University in Blacksburg, Virginia.

ABSTRACT

- This paper presents an original tool to optimize the long-distance freight transport by road based on an original methodology for allocating communication roads depending on the volume of orders.

The goal this system consists of helping traffic managers of transport companies to achieve the optimal distribution in order to reduce operational costs satisfying the service quality, optimizing the route and the loading of vehicles and grouping orders following proper load/unload procedures. The system developed is an intuitive application that enables a fast learning of the existing functionalities adapting in a very versatile way to any case study.

An algorithm based on the metaheuristic, ant colony optimization, is used to solve the problem taking into account the following specific characteristics: there is a maximum driving time per day, the vehicle capacity is limited, there are compatibility constraint of different types of goods in the same vehicle, customers have time constraints to pickup/deliver goods and the procedure of loading/unloading is LIFO (Last Input First Output).

The efficiency of the algorithm has been proved using data from real problems. The basis of our computational experiments is the historical data of an important freight transport company.

- **Keywords:** Long haul transportation, less than truckload, vehicle routing problem, ant colony optimization metaheuristic, decision support system.

RESUMEN

Este artículo presenta una herramienta para optimizar el transporte de mercancías de larga distancia por carretera basándose en una original metodología de asignación de vías de comunicación en función del volumen de pedidos.

La finalidad del sistema descrito consiste en ayudar a los gestores de tráfico de las empresas de transporte a conseguir la distribución óptima que reduzca los costes operacionales satisfaciendo la calidad de servicio, optimizando el llenado e itinerario de los vehículos y agrupando los pedidos siguiendo ciertos procedimientos de carga/descarga.

El sistema desarrollado es una intuitiva aplicación que permite un aprendizaje rápido de las funcionalidades existentes adaptándose de forma muy versátil a cualquier caso de estudio.

Un algoritmo basado en la metaheurística, optimización de colonia de hormigas, es usado para resolver el problema teniendo en cuenta las siguientes características específicas: hay un máximo de tiempo de conducción por día, la capacidad de los vehículos es limitada, hay restricción de compatibilidad de diferentes tipos de mercancía en un mismo vehículo, los clientes tienen restricciones temporales para recoger/entregar la mercancía y el procedimiento de carga/descarga es LIFO (último en entrar, primero en salir).

La eficiencia del algoritmo ha sido testeada usando datos de problemas reales. La base de nuestros experimentos son los datos históricos de una importante compañía de transporte de mercancías.

Palabras clave: Transporte de larga distancia, transporte de carga fraccionada, problema de planificación de rutas, metaheurística de optimización de colonia de hormigas, sistema de ayuda decisional.

1. INTRODUCCIÓN

En España, el transporte de mercancías por carretera representa más del 90% del total, siendo el transporte interregional el de mayor peso en toneladas transportadas [1]. En los últimos años, el transporte de larga distancia ha aumentado su complejidad debido a tres factores:

- 1º. Los intercambios se han multiplicado al reducirse el tamaño medio de los envíos.
- 2º. El valor medio de las mercancías transportadas ha aumentado, así como los requerimientos en rapidez, seguridad y fiabilidad.

3°. Debido a la globalización y a la apertura de los mercados, se han aumentado las distancias recorridas.

Por ello, los márgenes de beneficio se han ido reduciendo resultando más necesario mover mayores volúmenes de mercancía para que las empresas obtengan un beneficio aceptable [2]. Añadir que en España, las 10 mayores empresas dedicadas al transporte de mercancías en este ámbito, sólo tienen una cuota total del 13% del mercado [3].

Con este panorama, las empresas de transporte por carretera deben disminuir sus costes. Dos de los principales aspectos en los que deben incidir son: compartir la capacidad y mejorar la planificación de rutas, teniendo en cuenta, entre otros factores, la variabilidad de la demanda, los costes de combustibles y la congestión del tráfico. El problema resultante es muy complejo y necesita de mucha información, por lo que poseer un sistema que de soporte a la toma de decisiones (DSS, *Decision Support System*) supone una importante ventaja competitiva [4].

Tradicionalmente, el proceso de toma de decisiones ha requerido de mucha experiencia, tanto en el problema a tratar como en los métodos para resolverlo. Hoy en día, las herramientas informáticas son capaces de reducir significativamente tanto la necesidad de la experiencia adquirida, como el tiempo para obtener soluciones factibles que ayuden a las empresas a tomar decisiones de forma eficaz y a gestionar sus recursos de forma eficiente [5]. El DSS da soporte a las decisiones sistematizando la parte de análisis mediante la informática de forma que la perspicacia y opinión de los decisores pueda ser mejorada [6]. Por ello, un sistema que integre los algoritmos de resolución de problemas de transporte con las funciones de los sistemas de información geográfica, las bases de datos y las herramientas de modelado puede representar una importante ventaja competitiva [7].

Una de las contribuciones de este artículo es proponer una herramienta, para el transporte de mercancías de larga distancia, mediante la integración de las características esenciales de estos problemas complejos. Durante el diseño de la herramienta, ha resultado necesario definir un conjunto de criterios de vital importancia en relación a los responsables en la toma de decisiones. Por un lado, es imprescindible que el sistema de información presente los datos de manera sencilla para que la exploración de recursos resulte fácil de entender. Por otro lado, el sistema debe ser intuitivo para personas expertas y profesionales del problema, pero que no están familiarizadas con el algoritmo y el método de resolución.

Este trabajo se centra en el problema del transporte de larga distancia (LHT, *Long Haul Transportation*) usando lo que se denomina *peddling/collecting routes*, donde las compañías de transporte basadas en la consolidación de carga, realizan varias paradas para recoger o entregar la mercancía a los clientes en función de la demanda de cada uno [8]. En el transporte consolidado, las demandas de varios clientes son atendidos por el mismo vehículo por medio de lo que se denomina *Less-Than-Truckload carrier* (LTT) [9]. La tarea principal de este problema es determinar el conjunto óptimo de rutas para servir a un conjunto de clientes mediante una flota de vehículos. Todo ello cumpliendo un conjunto de restricciones entre las que destacan la no existencia de almacenes, la jornada máxima de conducción, el límite de capacidad de los vehículos, los

tipos de mercancía compatibles en el mismo vehículo y las ventanas de tiempo impuestas por cada cliente.

La literatura referida exclusivamente al problema LHT es todavía relativamente modesta siendo interpretados como el problema clásico de planificación de rutas (*Vehicle Routing Problem*) con múltiples almacenes, en el que el número de clientes coincide con el número de almacenes [10,11].

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema consiste en la optimización del transporte de mercancías de larga distancia por carretera entre varios orígenes y destinos sin la existencia de almacenes al inicio y al final de las rutas. El objetivo consiste en agrupar varios pedidos en el mismo vehículo para reducir el coste total basado en la minimización de la distancia recorrida y en la reducción del número total de vehículos utilizados para la distribución.

En este contexto, un pedido se define como la orden que lanza un cliente para el transporte de mercancía, pudiéndose recoger en uno o varios puntos y entregarse en uno o varios puntos. La distancia entre la entrega y la recogida está comprendida entre 100 y 1500 kilómetros y el tiempo requerido para realizar el servicio entre todos los puntos de una ruta suele ser como mínimo de 24 horas. Además, los clientes tienen una ventana temporal asociada dentro de la cual la distribución al cliente debe comenzar independientemente del tiempo que cueste realizar dicha operación de carga o descarga [12].

Hasta no hace mucho, este tipo de transporte era de carga completa, es decir, se destinaba un vehículo a un único pedido. En los últimos años, debido al descenso de este tipo de carga, resulta necesario combinar varios pedidos, sean o no del mismo cliente, en un mismo vehículo para rentabilizar la operación. En este escenario, hay que reducir al máximo las operaciones intermedias, como es la permanencia de los vehículos en los muelles, por lo que los vehículos pueden asemejarse a un almacén tipo LIFO (*Last Input First Output*), la primera mercancía recogida debe ser la última en ser entregada [13].

En el proceso de combinación de pedidos se considera el tipo de mercancía, ya que hay mercancías que son incompatibles. Existen tres tipos de mercancía: normal (temperatura ambiente), refrigerada (temperatura controlada e isotérmica) (en vehículos refrigerados pero sin temperatura controlada) que no pueden compartir vehículo, debido a que necesitan una temperatura diferente. Esto supone que la flota es heterogénea no en la capacidad de los vehículos sino en sus características técnicas.

Un aspecto característico del sector a nivel nacional es que la flota propia de las empresas suele ser bastante menor que la necesaria, obligando a contratar diariamente vehículos en función de las necesidades. Por ello, una de las finalidades es minimizar el número de vehículos necesarios, optimizando la agrupación de pedidos y respetando las ventanas horarias de los clientes. Al tratarse de larga distancia los vehículos realizarán como máximo una ruta al día, y en ocasiones, la ruta abarcará dos o tres días, teniendo en cuenta restricciones legales referentes a los tiempos de conducción, trabajo y descanso de los conductores.

El transporte de larga distancia en la península se realiza fundamentalmente a través de las grandes vías de comunica-

ción que la recorren. La vía que comunica un par de nodos origen-destino no es única, de manera que hay que seleccionar entre todas las posibles atendiendo a diferentes criterios como congestión de rutas, festivos, tiempos y costes de ruta o desvíos para pedidos intermedios. Destacar que esta decisión la toma el gestor de operaciones, resultando completamente transparente para el cliente ya que el precio que paga no depende de la vía seleccionada.

El trabajo diario de este tipo de empresas muestran una gran variación: el número de pedidos varía cada día, la localización geográfica de los clientes es dispersa, la cantidad de la mercancía varía constantemente y algunas veces, es necesario el uso de vehículos específicos. Notemos que si el número de pedidos de un día es de 500, supone un mínimo de 1000 nodos a visitar. Esta cifra puede aumentar mucho si los pedidos tienen más de un punto de recogida o de entrega. A modo de información, el número de nodos que pueden estar dados de alta en el sistema superan los 400,000.

Con esta cantidad de datos resulta inviable, tanto en memoria como en tiempo de acceso a la base de datos, almacenar una matriz de distancias y/o tiempos entre los diversos nodos. Por otro lado, es inviable tanto económicamente como en tiempos de computación, acceder a un sistema de información geográfica vía web, debido a la gran cantidad de solicitudes necesarias para determinar todos los elementos de la matriz. Por ello, para establecer los tiempos entre los nodos se consideran las distancias euclídeas a partir de su posición geográfica (latitud-longitud).

Establecido el procedimiento para calcular las distancias, lo siguiente a resolver es la velocidad media de los vehículos, teniendo en cuenta para ello que las distancias no corresponden con las distancias reales. En [14] se estudia la sensibilidad de la solución en el diseño de rutas para el transporte de carga fraccionada mediante centros de consolidación intermedios, variando la velocidad media entre 80 y 75 km/h y con distancias reales entre los nodos. En este trabajo, se establece un valor de velocidad media de 70 km/h.

La dificultad del problema LHT se basa en el hecho de que si el número de pedidos es grande el resultado de la combinación crece exponencialmente convirtiéndose en un problema complejo, siendo necesaria la aplicación de técnicas metaheurísticas para obtener un solución de alta calidad en tiempos de computación razonables.

3. ALGORITMO DE RESOLUCIÓN

El método utilizado es la metaheurística de optimización de colonia de hormigas (ACO, *Ant Colony Optimization*), la cual está inspirada en su comportamiento estructurado, comunicándose entre sí por medio de una sustancia química (feromona) para determinar el camino óptimo entre su nido y sus alimentos [15].

El algoritmo comienza generando una solución inicial factible. La solución original viene determinada por la asignación de cada pedido a un vehículo, sin embargo, sólo sería ideal si la carga ocupará la totalidad del vehículo. En el modelo desarrollado, se suponen pedidos relativamente pequeños debido al hecho de que la perspectiva de las empresas está cambiando hacia el llamado operador logístico, responsable de la gestión

de toda la cadena de suministro, con el fin de minimizar el coste de mantenimiento de inventario y de transporte de la mercancía.

El algoritmo propuesto está compuesto de tres ACOs diferentes:

- ACO I: Asignación de vía de comunicación para cada pedido
 - A priori: División del problema en varios más pequeños
 - A posteriori: Combinación de todos con todos
- ACO II: Selección del primer pedido de cada ruta
- ACO III: Selección del resto de pedidos para cada ruta

El primer ACO realiza la asignación a cada pedido de una cierta vía de su conjunto de vías factibles aplicando una regla de elección de acción probabilística (*pseudo-random-proportional rule*). Para ello, existen dos posibilidades, asignación a priori o a posteriori. En el primer caso, el algoritmo comienza con la asignación del pedido a una vía concreta del conjunto de vías factibles, subdividiendo el problema en tantos problemas como vías hay definidas (18 en nuestro caso para la Península), ya que sólo se pueden agrupar pedidos que vayan por la misma vía. En el segundo caso no se asigna la vía a priori antes de diseñar las rutas, sino que todos los pedidos pueden combinarse con todos.

El segundo ACO se usa para seleccionar el primer pedido de la siguiente ruta de entre todos los pedidos que quedan sin asignar generándose las rutas una a una. Para ello, se añade un nodo que actúa como un almacén ficticio que está conectado con cada pedido mediante arcos con coste nulo ya que no existen almacenes en el inicio y final de cada ruta.

Por último (tercer ACO), sólo queda insertar más pedidos en la ruta de los que quedan todavía sin asignar, teniendo en cuenta para ello las restricciones de compatibilidad, capacidad vehicular, de tiempo de conducción y las ventanas temporales de los clientes.

Durante el proceso, las hormigas utilizan el rastro de la feromona y la información heurística para construir soluciones factibles. En cada iteración del proceso, cada hormiga construye una solución del problema paso a paso. En cada paso, la hormiga hace un movimiento con el fin de completar la actual solución parcial eligiendo entre los elementos de un conjunto de estados de expansión de acuerdo a una función de probabilidad teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- η : información heurística (diferente para cada ACO)
 - ACO I: Coste por transportar el pedido por la vía
 - ACO II:
 - Capacidad disponible del vehículo después de cargar el pedido i
 - Distancia requerida para distribuir el pedido i
 - ACO III:
 - Capacidad disponible del vehículo después de cargar los pedidos i y j
 - Distancia requerida para distribuir los pedidos i y j
- τ : Nivel de feromona del movimiento que indica como de bueno fue en el pasado

$$\tau_0 = \frac{1}{n \cdot OBJ} \quad (1)$$

La Tabla I muestra la nomenclatura referente a las ecuaciones 1-4.

La fórmula para la función de probabilidad de cada ACO es:

• ACO I:

$$P_{ik} = \frac{(\tau_{via_{ik}})^{\alpha_{via}} \cdot (\eta_{via_{ik}})^{\beta_{via}}}{(\sum_{k=1}^{total_vias_i} \tau_{via_{ik}})^{\alpha_{via}} \cdot (\sum_{k=1}^{total_vias_i} \eta_{via_{ik}})^{\beta_{via}}} \quad (2)$$

• ACO II:

$$P_{ik} = \frac{(\tau_{primero_{ik}})^{\alpha_{primero}} \cdot (\eta_{primero_{ik}})^{\beta_{primero}}}{\sum_{i \in resto_pedidos(k)} (\tau_{primero_{ik}})^{\alpha_{primero}} \cdot (\eta_{primero_{ik}})^{\beta_{primero}}} \quad (3)$$

• ACO III:

$$P_{ij}^k = \frac{(\tau_{resto_{ij}^k})^{\alpha_{resto}} \cdot (\eta_{resto_{ij}^k})^{\beta_{resto}}}{\sum_{i \in N_pedidos_factibles_{ij}^k} (\tau_{resto_{ij}^k})^{\alpha_{resto}} \cdot (\eta_{resto_{ij}^k})^{\beta_{resto}}} \quad (4)$$

La regla *pseudo-random-proportional* combina la selección aleatoria con la mejor opción. Sea q_0 , un parámetro predefinido de antemano, tal que $0 \leq q_0 \leq 1$ y q , un número generado aleatoriamente en el intervalo $[0,1]$, entonces la mejor vía k para el ACO I, el mejor pedido i para el ACO II y el mejor pedido j para el ACO III son elegidos de acuerdo a:

$$k = \begin{cases} P_{ik} & \text{if } q \leq q_0 \\ K & \text{if } q > q_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$i = \begin{cases} P_{ik} & \text{if } q \leq q_0 \\ I & \text{if } q > q_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$j = \begin{cases} P_{ij}^k & \text{if } q \leq q_0 \\ J & \text{if } q > q_0 \end{cases} \quad (7)$$

donde k es seleccionado aleatoriamente de acuerdo a P_{ik} , I es seleccionado aleatoriamente de acuerdo a P_{ik} y J es seleccionado aleatoriamente de acuerdo a P_{ik} .

Una vez que cada hormiga termina, los niveles de feromona son actualizados con el fin de diversificar las soluciones obtenidas mediante las hormigas.

$$\tau = (1 - \phi) \cdot \tau + \phi \cdot \tau_0 \quad (8)$$

donde $0 < \phi \leq 1$, es un coeficiente constante que representa el nivel de persistencia de la feromona.

Después de que cada iteración acaba, es decir, cuando todas las hormigas han completado sus soluciones, los niveles de feromona son también actualizados.

$$\tau = (1 - \rho) \cdot \tau + \rho \cdot \left(\frac{1}{mejor_OBJ} \right) \quad (9)$$

donde $0 < \rho \leq 1$, es el coeficiente de la actualización de feromona en retrospectiva de la mejor solución obtenida y *mejor OBJ* representa el objetivo de la mejor solución.

Como ya se ha mencionado, el objetivo consiste en minimizar el coste total de la distribución, disminuyendo el número de vehículos utilizados y la distancia total recorrida. En primer lugar, se intenta reducir el número de rutas y en el caso, de que se obtengan soluciones con el mismo número de vehículos, se selecciona la de menor distancia, ya que este es el segundo parámetro que afecta al coste. Los pasos detallados del algoritmo para resolver el problema se muestra en el Fig. 1.

4. HERRAMIENTA INFORMÁTICA

Dada la diversidad y complejidad del problema y del gran volumen de información a tratar, una de las premisas a cumplir en el diseño del sistema ha sido ofrecer a los usuarios un entorno flexible, eficaz y fácil de usar. Para ello, la información referente a los parámetros y resultados debe presentarse de modo intuitivo.

τ_0	Valor inicial de la feromona y que es igual para los tres colonias de hormigas
n	Número total de pedidos a distribuir
OBJ	Objetivo de la solución inicial
P_{ik}	Probabilidad de que el pedido i vaya por la vía k (ACO I)
$\tau_{via_{ik}}$	Nivel de feromona del ACO I
$\eta_{via_{ik}}$	Información heurística del ACO I
$\alpha_{via}, \beta_{via}$	Parámetros para establecer la influencia de $\eta_{via_{ik}}$ frente a $\tau_{via_{ik}}$ (ACO I)
$total_vias_i$	Conjunto de vías por las que puede ir el pedido i
P_{ik}	Probabilidad de que el pedido i sea el primer pedido de la ruta por la vía k (ACO II)
$\tau_{primero_{ik}}$	Nivel de feromona del ACO II
$\eta_{primero_{ik}}$	Información heurística del ACO II
$\alpha_{primero}, \beta_{primero}$	Parámetros para establecer la influencia de $\eta_{primero_{ik}}$ frente a $\tau_{primero_{ik}}$ (ACO II)
$resto_pedidos(k)$	Resto de pedidos que pueden ir por la vía k
P_{ij}^k	Probabilidad de que el pedido j vaya después del pedido i por la vía k (ACO III)
$\tau_{resto_{ij}^k}$	Nivel de feromona del ACO III
$\eta_{resto_{ij}^k}$	Información heurística del ACO III
$\alpha_{resto}, \beta_{resto}$	Parámetros para establecer la influencia relativa de $\eta_{resto_{ij}^k}$ frente a $\tau_{resto_{ij}^k}$ (ACO III)
$N_pedidos_factibles_{ij}^k$	Resto de pedidos j que pueden ir detrás del pedido i por la vía k

Tabla I: Nomenclatura de las ecuaciones 1-4

- [1] Generar una solución inicial del problema.
- [2] Inicializar parámetros.
- [3] Calcular la feromona inicial.
- [4] Construcción de rutas: Cada hormiga comienza a crear rutas agrupando pedidos.
- [5] Si la asignación de vía es a priori, asignar vía de comunicación a cada pedido según la ecuación (5).
- [6] Selección del primer pedido a insertar en una ruta según la ecuación (6).
- [7] Selección de un pedido del conjunto de pedidos compatibles con el primer pedido insertado para añadirlo a la ruta según la ecuación (7). Los pedidos son compatibles si satisfacen las restricciones teniendo en cuenta la política LIFO.
- [8] Repetir [6] hasta que todos los pedidos hayan sido insertados en alguna ruta.
- [9] Actualización local de la feromona con el fin de diversificar las soluciones según la ecuación (8).
- [10] Repetir [4] hasta que cada una de las hormigas hayan construido una solución.
- [11] Actualización global de la feromona con la perspectiva de la mejor solución obtenida según la ecuación (9).
- [12] Si el número de iteraciones es mayor que el número de iteraciones planificadas o todas las hormigas convergen a la misma solución, guardar la mejor solución, sino continuar desde [4].

Fig. 1: Algoritmo de colonia de hormigas

4.1. ARQUITECTURA

La herramienta está compuesta de tres partes: base de datos (BD), interfaz gráfico de usuario (GUI) para representar la información e interactuar con el usuario, y algoritmo o motor de cálculo (Σ) responsable de determinar la solución. La comunicación entre el GUI y el motor de cálculo se realiza por medio de la BD. La representación esquemática de la arquitectura y el modus operandi del sistema se presenta en la Fig. 2.

La aplicación ha sido desarrollada como un entorno web y se encuentra alojada en un servidor al que se puede acceder de forma remota a través de un navegador. El SGBD (Sistema Gestor de Base de Datos) utilizado es MySQL y la interfaz ha sido desarrollada en PHP, un lenguaje que permite la generación de entornos web dinámicos y que requiere la incorpora-

ción de un servidor web. La distribución utilizada para la instalación de estas dos componentes es el servidor Xampp, que es independiente de plataforma, de distribución libre. Además, para dotar a la página de mayor vistosidad y rapidez se ha utilizado otros lenguajes como *Javascript*, *Ajax* y *CSS*.

Para el motor de cálculo se ha utilizado Microsoft Visual Studio 2008, que permite la generación de programas en lenguaje C++, siendo uno de los más eficientes y rápidos en la ejecución de un elevado número de cálculos.

4.2. INTERFAZ GRÁFICO DE USUARIO

El principal objetivo del GUI es facilitar el uso del DSS al responsable en la toma de decisiones, de manera que pueda gestionar la información y los resultados del sistema sencillamente. Por ello, durante su desarrollo se ha tenido en cuenta principios de usabilidad fundamentales: robustez, consistencia, compatibilidad, escalabilidad, interactividad e intuitividad [16].

El interfaz está basado en un conjunto de diferentes pantallas en las que se visualiza e interactúa de distinta forma según la información y funcionalidad aportada. La primera de ellas ha sido denominada 'menú' y permite el acceso al resto (Fig. 3). En la parte superior se muestra una barra azul con las diferentes pestañas para acceder a cada una de las secciones de la herramienta.

Si se analiza cada una de las pestañas, en primer lugar se tiene 'expediciones', que accede a una pantalla donde se listan los pedidos que van a ser origen del cálculo para la agrupación y planificación de las rutas. Las siguientes opciones del menú son parámetros y tarifas. La primera consta de un formulario donde se pueden modificar los parámetros del problema divididos en cuatro categorías: capacidades máximas de los vehículos, restricciones legales referentes a los conductores, restricciones temporales, y costes. La segunda muestra el coste entre cada par de provincias pudiendo ser modificado por el usuario.

La pestaña 'resultados' accede a una pantalla que muestra la solución obtenida por el motor de cálculo (ver Fig. 4). En la parte superior hay un pequeño menú de gestión para realizar diferentes operaciones (moverse entre las diferentes páginas, filtrar de acuerdo al criterio deseado, realizar una búsqueda, volver al menú principal...). Debajo de este menú se presenta

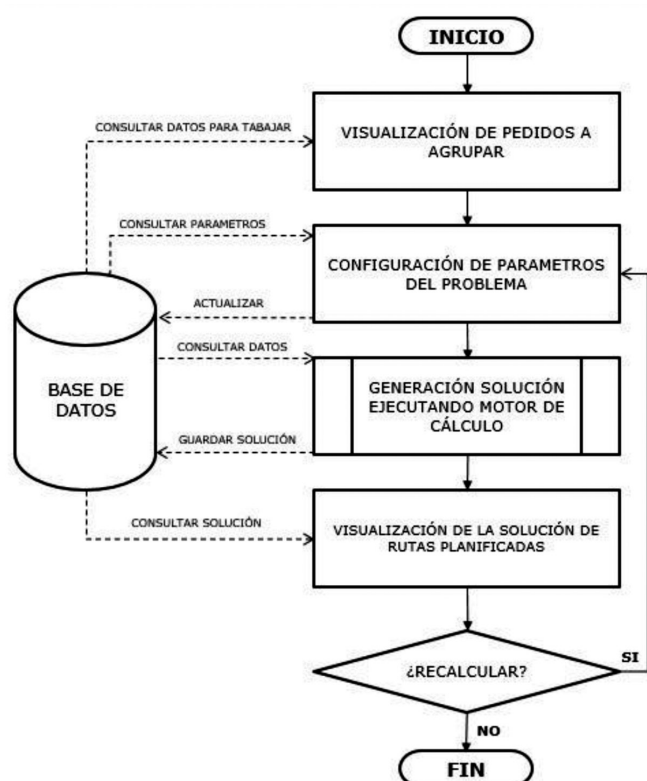


Fig. 2: Representación esquemática de la arquitectura y del flujo de datos/control

Fig. 3: Ventana de menú y parametrización

un resumen de la solución obtenida (número total de vehículos necesarios, coste total, etc.).

Las rutas generadas por el algoritmo de cálculo aparecen en el centro de la pantalla con sus características más importantes (código de ruta, ventanas horarias de recogida y entrega, tipo de mercancía, capacidades...) con la finalidad de que el usuario pueda identificar errores y particularidades.

Las últimas pestañas son 'histórico' y 'excluidos'. La primera tiene la misma apariencia que 'resultados', pero en este caso se muestran los datos históricos. La segunda, visualiza los pedidos que contienen errores en la BD y que no han podido ser incluidos en el cálculo.

Los datos necesarios para calcular las rutas y obtener una solución son los siguientes:

- Pedidos con sus características:
 - Mercancía a transportar: Volumen, kilos, metros lineales y pales.
 - Ingresos.
 - Operaciones de recogida y entrega: número, dirección y posición geográfica de cada nodo, cantidad a cargar/descargar en cada nodo, fechas y ventana temporal de cada cliente.
- Parámetros.
- Tarifas: coste asociado a cada par de nodos.
- Vías de comunicación.

Para validar cada una de las rutas, el responsable en tomar la decisión debe visualizar las características de la ruta, así como la ocupación del vehículo en cada tramo. Entre los parámetros de la ruta destacan: origen y destino, tipo de carga,

ocupación del vehículo, y fechas estimadas para cada una de las paradas intermedias que realice el vehículo.

El itinerario de cada ruta se muestra mediante el uso de Google Maps, que permite representar sobre cartografía real cada una de las rutas con el fin de tener una mejor visión.

5. CASO DE ESTUDIO

El trabajo diario de las compañías que distribuyen mercancía con grandes distancias está sujeto a un alto grado de variación, por lo que resulta necesario testear el algoritmo implementado para el problema LHT bajo diferentes condiciones de trabajo. Para ello, debido a que no se han encontrado trabajos específicos relacionados con este tema, la base de nuestro caso de estudio ha sido extraída del trabajo diario de una importante empresa de transporte que distribuye mercancía por el territorio peninsular.

Para crear cada instancia, se extrajeron de los datos históricos todos los pedidos atendidos diariamente teniendo en cuenta la posición geográfica de los puntos de recogida y entrega, la cantidad y tipo de mercancía, el intervalo de tiempo para

Número de pedidos	Número de clientes visitados
99	259
201	418
498	1172
750	1700
990	2247

Tabla 1: Número de pedidos y clientes del caso de estudio

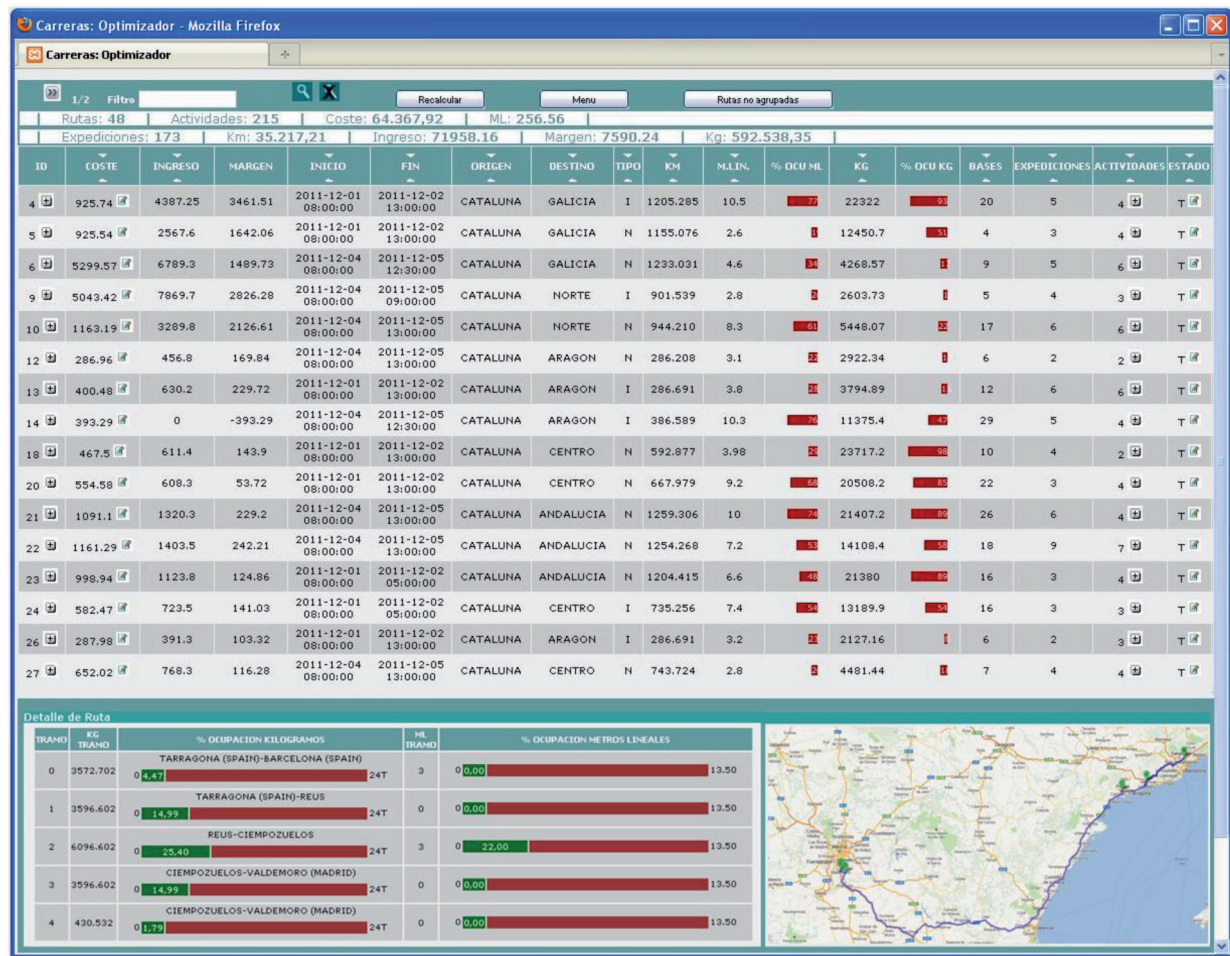


Fig. 4: Ventana de resultados

realizar dicha operación y las ventanas de tiempo para acudir a los distintos clientes. El número de pedidos diarios estudiados, está entre 90 y 1000. Notar que esto significa que se visitará al menos el doble de clientes. La Tabla I muestra el número de pedidos considerados para cada día y los clientes visitados. Por otro lado, hay tres rangos de pedidos en función de su tamaño. Este es un parámetro básico si se pretende agrupar pedidos en un mismo vehículo. Para ello, se ha establecido 3 grupos (pequeños, medianos y grandes), y la gran parte de los días, el número de pedidos pertenecientes a cada grupo se mantiene dentro de unos límites (Ver Tabla II).

Kilos	Porcentaje de pedidos
0 - 4999	68 - 80
5000 - 14999	15 - 25
15000 - 24000	4 - 10

Tabla II: Tamaño de los pedidos

Tanto en la literatura específica del tema como en experimentos piloto realizados, se indica que una de las restricciones más importantes a la hora de agrupar pedidos son las ventanas de tiempo impuestas por los clientes. En el caso objeto de este trabajo, algunos de los clientes no imponen un intervalo de tiempo, sino que indican la hora a la que el vehículo debe estar colocado en el muelle, lo que se traduce en un considerable tiempo de espera. Así, una medida para reducir el

Nº caso	Pedidos	Nodos	Mercancía (kg)	Via	ΔTW
C11	99	259	359196	0	0
C12				0	2
C13				0	4
C14				1	0
C15				1	2
C16				1	4
C21	201	418	754095	0	0
C22				0	2
C23				0	4
C24				1	0
C25				1	2
C26				1	4
C31	498	1172	1867750	0	0
C32				0	2
C33				0	4
C34				1	0
C35				1	2
C36				1	4
C41	750	1700	2839452	0	0
C42				0	2
C43				0	4
C44				1	0
C45				1	2
C46				1	4
C51	990	2247	3532769	0	0
C52				0	2
C53				0	4
C54				1	0
C55				1	2
C56				1	4

Tabla III: Parámetros del caso de estudio

coste se basa en la ampliación de dichas ventanas horarias. Por ello, se estudiará la influencia de esta restricción, ampliando las ventanas 2 y 4 horas.

El caso de estudio generado es detallado en la Tabla III. Cada una de las columnas indica respectivamente el número de caso, el número de pedidos, el número de nodos a visitar, la mercancía transportada (kg), la asignación de vías antes o después de diseñar la ruta (0-posteriori; 1-priori) y el incremento de la ventana temporal en horas (ΔTW).

Por último, las restricciones impuestas en todas las instancias son:

- Capacidad máxima vehículo: 24000kg, 13.5metros lineales, 33pales no remontables y 92.95m³.
- Velocidad media: 70km/h.
- Conducción máxima de los conductores: 9h.
- Tiempo de operación de carga/descarga:1.5h

5.1. RESULTADOS

Para medir la eficiencia de la solución obtenida establecimos tres métricas de rendimiento: número total de vehículos necesarios (f_1), porcentaje del número de pedidos agrupados

respecto el número total (f_2) y porcentaje de vehículos que llevan más de un pedido respecto al total de vehículos utilizados (f_3).

Además, fue necesario estimar el valor de los parámetros que influyen en los tres ACOs. Para ello, se revisó la literatura y se llevaron a cabo pruebas para determinar dichos valores. Los parámetros mantienen un valor constante durante la ejecución del algoritmo ($\alpha = 1$, $\beta = 2$, $\varphi = p = 1$), excepto q_0 que comienza en 0.5 pero va variando en cada iteración con un incremento de 0.1.

Los resultados del estudio son listados en la Tabla IV. Las primeras cuatro columnas definen los parámetros de configuración de cada instancia. Las columnas 5-7 se refieren a f_1 y muestran la mejor solución, la peor y la media de las 10 pruebas realizadas de cada caso. Las columnas 8-10 se refieren a f_2 y las 3 últimas a f_3 .

Tras la revisión de los resultados y como cabía esperar, en todos los casos conforme aumenta la ventana temporal de los clientes, el número de rutas es menor. Cuando la ventana se amplía en 2 horas, la disminución de rutas es del 40% si se asigna la vía a posteriori. La disminución de rutas es poco apreciable cuando el aumento de la ventana es de 2 a 4 horas.

Nº Caso	Pedidos	Vía	ΔTW	Vehículos necesarios			% pedidos agrupados			% vehículos con más de un pedido		
				$f_{1\text{mejor}}$	$f_{1\text{peor}}$	$f_{1\text{media}}$	$f_{2\text{mejor}}$	$f_{2\text{peor}}$	$f_{2\text{media}}$	$f_{3\text{mejor}}$	$f_{3\text{peor}}$	$f_{3\text{media}}$
C11	99	0	0	70	71	70.2	48.4	46.4	48.0	26.7	23.9	25.3
C12		0	2	42	44	42.9	83.8	79.8	81.9	59.5	55.9	55.9
C13		0	4	38	40	39.4	85.8	82.3	84.8	62.5	52.7	59.4
C14		1	0	78	83	80.2	38.3	30.3	33.4	20.5	14.8	16.7
C15		1	2	58	65	59.4	64.6	59.5	62.6	38.9	31.6	36.0
C16		1	4	54	61	60.0	68.6	59.6	59.2	44.8	29.0	34.0
C21	201	0	0	79	82	80.5	82.5	81.0	81.7	57.5	54.3	55.8
C22		0	2	52	54	53.5	94.5	94.0	94.1	83.3	81.1	82.3
C23		0	4	47	49	48.2	95.0	94.5	94.8	79.5	76.6	77.5
C24		1	0	102	112	105.5	75.1	68.1	70.9	52.4	43.7	45.5
C25		1	2	78	83	80.5	86.0	80.6	83.2	65.8	54.2	59.7
C26		1	4	78	81	80.2	87.5	84.0	85.6	70.9	60.2	64.9
C31	498	0	0	220	224	222.7	72.4	71.6	72.0	37.2	35.7	36.4
C32		0	2	136	141	138	89.5	88.3	89.0	60.5	57.4	59.1
C33		0	4	136	139	137	88.9	88.1	88.4	58.0	55.4	56.6
C34		1	0	268	278	272.5	66.4	63.2	64.6	36.9	33.2	34.5
C35		1	2	188	195	191.5	82.9	80.7	82.0	54.4	49.7	52.0
C36		1	4	180	188	183.5	83.3	80.9	82.1	53.0	48.3	49.9
C41	750	0	0	307	310	308.5	75.8	75.2	75.6	41.4	40.0	40.9
C42		0	2	186	189	187	92.2	91.8	91.7	68.8	66.1	67.1
C43		0	4	180	184	182.2	92.0	91.0	91.6	87.2	63.5	65.6
C44		1	0	360	376	363	71.8	68.2	70.1	41.3	36.7	38.7
C45		1	2	237	248	241.5	87.3	84.9	86.2	62.0	54.4	57.3
C46		1	4	229	236	233.5	88.0	85.4	86.6	58.5	53.8	56.8
C51	990	0	0	403	411	408.4	75.5	75.1	75.4	40.8	38.9	39.9
C52		0	2	238	245	241.3	91.6	90.9	91.3	66.2	63.6	64.8
C53		0	4	233	235	233.3	91.8	91.0	91.3	64.5	61.7	63.3
C54		1	0	471	475	472.7	70.9	69.9	70.4	38.8	37.2	37.9
C55		1	2	300	309	304.5	87.5	86.4	87.0	59.6	56.6	58.2
C56		1	4	291	292	291.5	87.7	87.1	87.4	58.4	56.0	57.0

Tabla IV: Resultados del caso de estudio

Notar también que cuando la ventana temporal pasa de 2 a 4 horas, el n° total de rutas y la métrica f3 disminuyen. Esto significa que el número de rutas con más de un pedido disminuye, pero no aquellas que sólo llevan una orden, ya que son órdenes que no permiten su agrupación con otras.

Otro factor influyente es la forma en que el algoritmo asigna la vía a las rutas. En todos los casos, observamos que los mejores resultados se obtienen cuando se asigna la vía tras construir la ruta. Uno de los aspectos que puede intervenir es que los pedidos no están uniformemente distribuidos en la Península, sino que tienen origen o destino en unas regiones muy determinadas, por lo que la combinatoria está dirigida por esta característica.

Por último y en referencia a la métrica f2, los valores obtenidos son muy similares independientemente del n° total de pedidos.

6. CONCLUSIONES

En este artículo, se ha presentado un sistema para ayudar en la toma de decisiones en la planificación de rutas de las compañías que se dedican al transporte diario de mercancías de larga distancia por carretera en la Península Ibérica, con un número variable y grande de pedidos y sin almacenes al inicio y/o final de la ruta.

El sistema propuesto en este estudio puede ser de gran utilidad para empresas de transporte ya que aunque existen otras herramientas en el mercado esta podría ser más económica y además, se trata de una intuitiva aplicación que permite un aprendizaje rápido de las funcionalidades del sistema adaptándose de forma muy versátil a cualquier caso de estudio.

Para ello, una de las premisas de partida ha sido que la herramienta diseñada sea fácil de usar por parte del usuario, tanto en la introducción de los datos como en la lectura de resultados, teniendo en cuenta que este agente no tiene porqué tener conocimientos sobre el motor de optimización.

En la resolución del problema se ha utilizado una metaheurística basada en colonias de hormigas, que ha permitido modelar el sistema teniendo en cuenta sus peculiaridades más características: no existencia de almacenes al inicio y final de la ruta; posibilidad de conectar dos nodos por más de una vía; clientes con ventanas de tiempo para recoger/entregar mercancía; incompatibilidad de carga; y forma de cargar/descargar los vehículos (el primer pedido que se carga es el último en ser descargado).

Por otro lado, se ha validado la eficiencia del algoritmo de cálculo mediante el caso de estudio extraído de los datos históricos de una empresa, con un número de pedidos entre 99 y 990, en las que se ha estudiado la influencia de la forma de asignación de vías, así como el tamaño de las ventanas de tiempo en términos de la función objetivo (número de vehículos utilizados), del porcentaje de pedidos agrupados respecto del total y del porcentaje de vehículos que llevan más de un pedido respecto del total de vehículos.

Para finalizar, queremos destacar que el sistema se ha concebido como una herramienta de ayuda a los gestores de tráfico de las empresas del sector, ya que éste es el que, dada una solución, decide qué rutas se realizan y de qué manera se realizan con el objetivo de conseguir la distribución óptima

que reduzca los costes operacionales satisfaciendo la calidad de servicio de todos los clientes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Fomento. Observatorio de Transporte de Mercancías por Carretera. Madrid, 2011.
- [2] Ministerio de Fomento. Plan Estratégico de Actuación para el Transporte de Mercancías por Carretera. Madrid, 2008.
- [3] DBK. Transporte de Mercancías por Carretera: Mercado Ibérico. Informa D&B: Grupo CESCE, Madrid, España, 2011.
- [4] Hoff A, Andersson H, Christiansen M, et al. "Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing". *Computers & Operations Research*. 2010, Vol.37, p.2041-2061. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.015>.
- [5] Turban E, Aronson JE, Liang TP, et al. *Decision Support and Business Intelligence Systems*. 8th edition. Upper Saddle River: Pearson-Prentice Hall, 1997. ISBN:0131986600.
- [6] Igbaria M, Sprague RH, Basnet C, et al. "The impact and benefits of a DSS: The case of FleetManager". *Information & Management*. 1996, Vol.31, p.215-225. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7206\(96\)01078-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7206(96)01078-6).
- [7] Keenan PB. "Spatial decision support systems for vehicle routing". *Decision Support Systems*. 1998, Vol.22-1, p.65-71. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9236\(97\)00054-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9236(97)00054-7).
- [8] Crainic TG. "A Survey of Optimization Models for Long-Haul Freight Transportation". In: Hall RW (ed). *Handbook of Transportation Science*. USA: Kluwer academic publishers, 2002. p. 451-516.
- [9] Jian Z, Yaohua W, Jingbo W. "A real case of routing design for less-than-truckload motor carriers using genetic algorithm". In: *Proceedings of the 26th Chinese Control Conference*. China, 2007. p. 498-501. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CHICC.2006.4347435>.
- [10] Toth P, Vigo D. *The Vehicle Routing Problem*. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. Philadelphia: SIAM, 2001. ISBN:0-89871-498-2.
- [11] Renaud J, Laporte G, Boctor FF. "A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem". *Computers & Operations Research*. 1996, Vol.23-3, p.229-235. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548\(95\)00026-P](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(95)00026-P).
- [12] Taner F, Galić A, Carić T. "Solving Practical Vehicle Routing Problem with Time Windows Using Metaheuristic Algorithms". *Promet Traffic & Transportation*. 2012, Vol.24-4, p. 343-351. DOI: <http://dx.doi.org/10.7307/ptt.v24i4.443>.
- [13] Li Y, Lim A, Oon WC, et al. "The tree representation for the pickup and delivery traveling salesman problem with LIFO loading". *European Journal of Operational Research*. 2011, Vol. 212-3, p.482-496. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.02.008>.
- [14] Barcos L, Rodríguez V, Álvarez M, et al. "Routing design for less-than-truckload motor carriers using Ant Colony Optimization". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2010, Vol.46-3, p.367-383. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.11.006>.
- [15] Dorigo M, Stützle T. "Ant colony optimization: overview and recent advances". In: Gendreau M, Potvin JY (eds). *Handbook of Metaheuristics*. USA: Springer, 2010. p. 227-263. DOI:10.1007/978-1-4419-1665-5_8.
- [16] Dix A, Finlay J, Abowd G, et al. *Human-Computer Interaction*. 3rd Edition, New Jersey: Prentice Hall, 2004. ISBN:100130461091.