

Optimización por colonias de hormigas para la gestión de flotas de transporte de viajeros en sistemas logísticos avanzados

Francisco Javier Diego Martín, José Ángel González Manteca, Javier Carrasco Arias

Dpto. de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística. E.T.S Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Calle José Gutiérrez Abascal, 2 28006. Madrid.
javier.diego@upm.es, jagonzalez@etsii.upm.es, javier.carrasco@upm.es

Resumen

La gestión de flotas es el eje central de las operaciones de muchas empresas de transporte de viajeros (terrestre, marítima o aérea). Una correcta gestión de flotas incide directamente en la cuenta de resultados de la empresa, por lo que es de suma importancia realizar operaciones de optimización que lleven a un aumento del beneficio de la operativa. Una completa gestión de flotas requiere de un sistema de toma de decisiones guiado por varios procesos de optimización. La calidad cuantitativa de la solución que ofrecen estos procesos es de vital importancia para una correcta gestión de la flota, por lo que su resolución debe estar basada en la aplicación de un cierto enfoque científico. En este artículo presentamos AntFleet, que es una herramienta software que ayuda al decisor en varias fases de la gestión de la flota, y resuelve los problemas de optimización aplicando colonias de hormigas.

Palabras clave: Asignación de flotas, sistema logístico avanzado, colonias de hormigas

1. Introducción

Sherali y otros (2005) refleja la gran importancia en el beneficio que tiene para una compañía aérea la toma de decisiones sobre su flota, y por tanto su gestión constituye un componente esencial para la empresa. En este artículo discutimos la solución de problemas reales de gestión de flotas de vehículos que puede aplicarse a un gran número de empresas de transporte de pasajeros. La principal idea es optimizar una flota de vehículos mediante la aplicación de tres problemas de optimización, aplicándolos en tres fases consecutivas (dimensionado, planificación y replanificación) en diferentes momentos de gestión de la flota. Más importante que desarrollar un sistema de optimización de flotas es desarrollar un sistema con capacidades de sistema de apoyo a la toma de decisiones, que dote a la gerencia de la empresa de una herramienta que permita estudiar diferentes escenarios de trabajo producidos en un entorno cambiante, para permitir tomar decisiones fundamentadas en los resultados que ofrecen unos procesos de optimización con una base científica que garantice la calidad de los resultados.

Un esquema tradicional de gestión de flotas es el que se muestra en la Figura 14. El Departamento Comercial define los trayectos comerciales con una determinada antelación a su realización (en el diagrama, dos semanas). Estos trayectos se crean para determinados tipos de vehículos o incluso se pueden crear las rotaciones para un vehículo concreto. Esos trayectos son planificados por el Departamento de Operaciones, que combina los trayectos definidos por Comercial y las actividades de mantenimiento de los vehículos. Esta

planificación se realiza con una cierta antelación a la fecha de realización del trayecto (una semana en la figura). Llegado el día de la realización, el Departamento de Control de Operaciones se encarga de que se realice el trayecto y resuelve las incidencias que puedan surgir en la evolución de toda la operativa. Toda la información se almacena en una base de datos para estudiarla a futuro y poder hacer estudio para extraer conclusiones, y como base para el desarrollo de otros procesos de negocio.

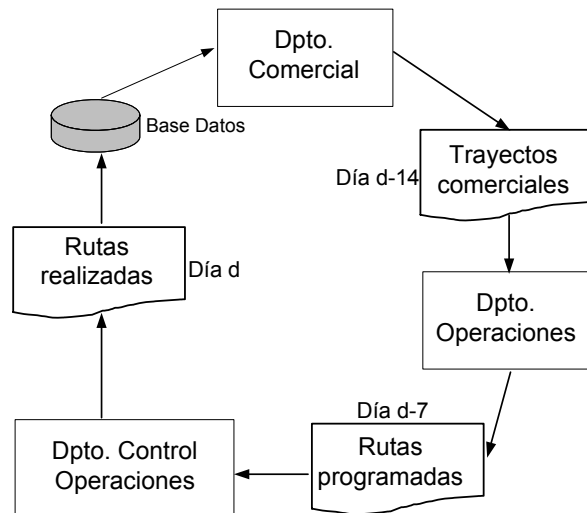


Figura 14. Flujo de trabajo de le empresa de transporte de viajeros

Es posible aplicar procesos de optimización en cada una de las fases anteriores de gestión de la flota, como muestra la Figura 15, donde se muestran todos los procesos de optimización que se pueden plantear en cada una de las fases del flujo de trabajo tradicional que mostraba la Figura 14. Cada uno de los procesos de optimización tiene sentido en una determinada fase dentro del flujo de trabajo. De esta forma se puede construir un Sistema Logístico Avanzado (ALS, Advanced Logistics System), como lo definen Gambardela y otros (2003), donde por una parte se intentan integrar las etapas del modelo de negocio, y por otra, toda la información que genera la empresa, de forma que toda la operativa sea vista como un único proceso desde el comienzo hasta el final, en el que se introducen varios procesos de optimización. Dentro del cuadro punteado figuran todos los procesos que deben mejorar la gestión de flotas de la empresa. Fuera del cuadro punteado aparece al flujo de trabajo de la empresa, cuyos resultados deben ser mejorados por las opciones de optimización.

En el presente artículo se definen, formulan y resuelven cada uno de los procesos de optimización del sistema ALS, y se argumenta la importante relación que existe entre ellos, lo que lleva a un constante diálogo entre departamentos para lograr un mejor resultado global como empresa. Se hace una breve introducción a la resolución de los problemas mediante la metaheurística de optimización mediante colonias de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO), que es una técnica no empleada hasta hora en este tipo de problema, y que ofrece muy buenos resultados. Se muestra una comparativa con la resolución mediante programación lineal entera mixta, que es la técnica más utilizada para este tipo de problema.

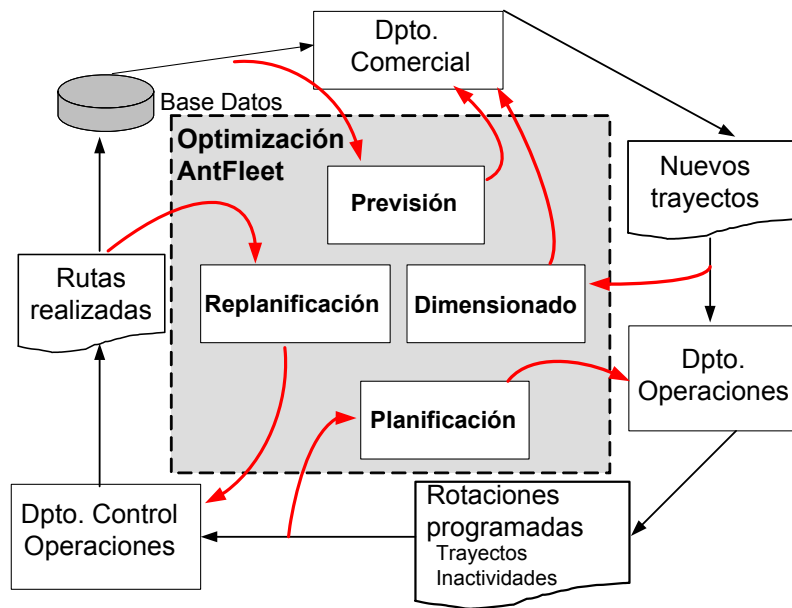


Figura 15. Flujo de trabajo de la empresa de transporte de viajeros con procesos de optimización

2. Sistema logístico avanzado

Si no se realiza el dimensionado, el Departamento Comercial elabora una lista con todos los trayectos que se deben realizar y se la entrega al Departamento de Operaciones, que realiza una programación de vehículos, es decir, crea las rotaciones de los vehículos para realizar todos los trayectos. El Departamento Comercial puede hacer una preoptimización operativa si crea rotaciones completas para vehículos (o tipos de vehículos) individuales. Esta preoptimización consiste en ir ajustando la salida de los trayectos de forma que salgan buenas rotaciones para los vehículos individuales. A veces, para que salgan buenas rotaciones, se deben cambiar las salidas de los trayectos a horas que no son las más adecuadas desde un punto de vista comercial. Esta preoptimización por vehículo no es una optimización global, y por tanto, puede ser mejorada mediante un mecanismo de optimización global donde entren en juego a la vez todos los trayectos y todos los vehículos.

El dimensionado consiste en crear las rotaciones de trayectos de forma que se utilice el menor número posible de vehículos. Esta primera optimización del número de vehículos la debe hacer el Departamento Comercial, porque es el que tiene el conocimiento del mercado y de los clientes, pero no debe hacerla de una forma aislada, sino en continua comunicación con Operaciones y bajo la supervisión de la Gerencia de la empresa. Vemos que es un proceso en el que intervienen varias partes de organización y eso es bueno porque permite unificar objetivos. El tipo de comunicación que debe aparecer entre las partes comercial y operativa radica en el número de vehículos. Comercial puede preguntar a Operaciones el número de vehículos de que dispone en un periodo de tiempo; también puede solicitar un estudio de viabilidad de aumentar el número de vehículos, analizadas las perspectivas comerciales. Operaciones deberá evaluar la disponibilidad de los vehículos propios (teniendo en cuenta las operaciones de mantenimiento y reparación) y considerar las posibilidades de alquilar vehículos a otras compañías. Gerencia deberá realizar un estudio económico para estudiar la viabilidad de la operación y aprobarla o denegarla, lo que seguramente obligaría a un reajuste de trayectos, que supondría lanzar el proceso de dimensionado con otras variables de entrada más ajustadas. Pero Comercial no sólo preguntará sobre la posibilidad de aumentar la flota disponible; también podrá informar de que sobran vehículos, en cuyo caso Operaciones deberá estudiar la forma de darles una salida para que generen ingresos. Un aspecto muy

importante en este mecanismo de diálogo generado por Comercial es que los datos que ofrece a Operaciones deben estar generados de una forma precisa: no se puede informar de la necesidad de un nuevo vehículo y que después Operaciones realice una planificación de trayectos y se observe que en realidad no es necesario ese vehículo. Esta precisión sin duda debe estar proporcionada por una herramienta de optimización (enfoque científico) que garantice que la propuesta comercial es físicamente realizable con el menor número de vehículos. A este problema de calcular el número mínimo garantizado de vehículos necesarios para cubrir una operativa de transporte lo vamos a llamar dimensionado de flotas.

Una vez conocido el número de vehículos necesarios, el siguiente paso consiste en asignar cada uno de los trayectos a un vehículo físico. Si desde que se hizo el plan comercial hasta el momento de la planificación no se ha realizado ningún cambio, este proceso de planificación puede ser una simple asignación de matrículas de vehículos a las rotaciones calculadas por el proceso de dimensionado, con el único requisito de que la planificación del periodo sea continua desde el periodo anterior, es decir, el fin del periodo anterior al de planificación debe ser seguido por el nuevo de una forma físicamente realizable por la flota. Surge aquí un pequeño problema de optimización en el que no es raro que se deban incluir trayectos en vacío o de posicionamiento si las semanas no son continuas en cuanto a destinos y orígenes.

En el problema de dimensionado se crean rotaciones para tipos de vehículos, garantizando que el número de ellos es mínimo. Si todos los vehículos de un mismo tipo tienen los mismos costes de operación para un mismo trayecto, el problema de planificación o asignación de vehículos es el descrito en el apartado anterior. Pero si dentro de un mismo tipo de vehículo, se induce en diferentes costes en función del vehículo concreto (porque usan diferentes tecnologías de propulsión, por su diseño, por su antigüedad,...) asignado a cada trayecto, surge un auténtico problema de optimización: realizar la asignación de vehículos de forma que se origine el menor coste de operación, conociendo el número de vehículos necesarios (dado por el dimensionado) y las características de cada uno de los vehículos de ese tipo.

Existe otro factor que hace que no siempre se puedan asignar directamente las rotaciones generadas en el proceso de dimensionado a vehículos en el proceso de planificación: las operaciones de mantenimiento. Algunas están programadas con mucho tiempo de antelación pero otras no. Dado que el proceso de dimensionado se realiza con un cierto tiempo de antelación y dado que se realiza para vehículos genéricos, es difícil considerar las operaciones de mantenimiento en el proceso de dimensionado.

Se ha creado un esquema de dos procesos de optimización diferentes, con entradas diferentes y criterios de optimización diferentes, pero continuos, es decir, la salida del dimensionado es una entrada de la planificación, y en el que están involucrados los departamentos Comercial y Operaciones, y supervisados por Gerencia, lo que puede llevar a una consecución de objetivos como empresa global, que es más importante que la consecución de objetivos departamentales aislados.

Todavía queda hablar sobre el tercer tipo de proceso de planificación que surge de forma natural en muchos sistemas de asignación de recursos: la replanificación. En general es difícil que una planificación de una flota se lleve a cabo según lo previsto. A menudo surgen una serie de incidencias que no están previstas y que obligan a cambiar la planificación para lograr una mejor adaptación a esas incidencias. A menudo estos cambios se realizan de una forma manual en un centro de control de operaciones con la ayuda de editores gráficos como diagramas de Gantt. También pueden tener cabida en esta fase herramientas de optimización. De cualquier forma, este tipo de problema escapa al ámbito de estudio del presente trabajo.

De esta forma hemos construido un Sistema Logístico Avanzado (ALS, Advanced Logistics System), como lo definen Gambardela y otros (2003), donde por una parte se intentan integrar las tres etapas de un modelo de negocio tradicional, producción, distribución y ventas, y por otra, toda la información que genera la empresa, de forma que toda la operativa sea vista como un único proceso desde el comienzo hasta el final, en el que se introducen varios procesos de optimización. Mathaisel (1996) explica la importancia de la integración de la ciencia de la computación y la investigación operativa para lograr un sistema de soporte a la toma de decisiones para el control de las operaciones de una compañía aérea. Explica que la planificación de aviones debe estar integrada con el resto de sistemas de la empresa. Un componente necesario que ha de tener una aplicación de gestión de flotas son interfaces gráficos avanzados debido a la complejidad que supone trabajar con un elevado número de vuelos.

Una vez descrito el marco del problema bajo estudio en este artículo, en el siguiente apartado se hace una revisión bibliográfica de estos tipos de problemas. Posteriormente se enumeran las variables de decisión que aparecen en el problema y se describen las que introducimos para presentar un modelo flexible que sea aplicable a la realidad de las empresas de transporte de viajeros. Posteriormente se hace una breve introducción al concepto de metaheurística y en particular a la que se va a utilizar para la resolución de los problemas: colonización de hormigas (ACO). Finalmente se hace una definición formal de los dos problemas, se plantea un modelo matemático y se resuelven mediante programación lineal y ACO. Se concluye con una comparativa de ambos métodos.

3. Dimensionado de flotas

La mayoría de los artículos que tratan el tema de optimización de flotas de vehículos están referidos al transporte aéreo. Ioachim y otros (1999) introducen restricciones en las que un mismo vuelo debe salir todos los días para los que esté definido, a la misma hora. Trabajan con diferentes tipos de vehículos, incorporan ventanas de tiempo en la salida y modela el problema mediante programación lineal, que resuelve aplicando un método 'branch and bound' diseñado a medida para este problema. Moudani y Mora-Camino (2000) aplican programación dinámica para resolver el FAP y una técnica heurística para planificar tareas de mantenimiento.

Bélanger y otros (2006) definen el FAP como la asignación del tipo de avión que ofrezca mayor beneficio a cada vuelo. El beneficio de un vuelo es función de la demanda prevista de pasajeros y los costes operativos del avión. Consideran ventanas de tiempo en la salida, penalizando las salidas de vuelos muy seguidas entre los mismos orígenes y destino. Consideran duraciones de trayectos dependientes del tipo de avión. Proponen un modelo matemático basado en una estructura de red multi-artículo no lineal. Bélanger y otros (2006b) introducen el concepto de homogeneidad para asignar el mismo tipo de avión a los mismos trayectos realizados en diferentes días de la semana para favorecer el servicio de atención de vuelos en tierra.

Sherali y otros (2005) reflejan la gran importancia en el beneficio que tiene para una compañía aérea la toma de decisiones sobre su flota, y por tanto su gestión constituye un componente esencial para la empresa. Es un tutorial muy completo que resalta la integración del FAP con otros procesos de negocio de la empresa, y propone técnicas para resolver el problema, tomando como objetivo el beneficio de la operativa, conocidas las previsiones de pasaje y el coste operativo. Define el FAP como la asignación de tipos de aviones, cada uno con diferentes capacidades, a los vuelos previstos, basada en costes operativos y los

potenciales beneficios. Presenta una serie de modelos que clasifica en primera instancia como modelos básicos (maximiza beneficio menos coste mediante programación lineal entera mixta), modelos integrados (combina el FAP con otros procesos de negocio) y modelos con consideraciones adicionales (pasajeros que realizan varios vuelos seguidos, diferentes vuelos en diferentes días de la semana, travesías). Suhl y Suhl (1999) definen problemas independientes para cada flota de aviones y considera la ventana de tiempos en la salida como principal opción de optimización para el FAP. El objetivo debería ser maximizar beneficios, pero como es difícil estimar el beneficio de ciertos vuelos en una programación a largo plazo, aproxima ese objetivo por la minimización del número de aviones necesarios. Resuelven el problema mediante programación entera mixta con reducción de coeficientes.

Götz y otros (1999) resuelven el problema de asignación de flotas semanales para compañías aéreas mediante SA, mostrando que los resultados son comparables a la programación lineal entera, con la ventaja de que la solución mediante SA requiere menos tiempo de computación y es más fácil modelar restricciones adicionales. Su formulación permite trabajar con varios tipos de vehículos.

Nosotros hemos considerado el problema según introdujimos en Diego y González (2007), donde se considera un modelo muy flexible que permite la resolución de una amplia variedad de problemas de la vida real porque introduce una serie de opciones de modelado muy genéricas. Este modelo introduce las ventanas de tiempo discreta en la salida de los trayectos, que es un conjunto de franjas horarias en las que se puede definir la salida de un trayecto. Se introdujeron también las relaciones de precedencia entre trayectos, como relaciones de carácter general que permiten establecer relaciones temporales entre las horas de salida y de llegada entre trayectos y que permiten expresar una gran cantidad de requerimientos de situaciones de la vida real de empresas de transporte de viajeros. También se introdujo la duración (y por tanto, la velocidad) de un trayecto como opción de optimización. También se introdujo un aspecto no cuantitativo en el modelo: la preferencia en la hora de salida dentro de las franjas que definen las ventanas. El sistema se resolvió mediante colonias de hormigas, y se mostró que es una técnica competitiva con la programación lineal entera para problemas pequeños, y más eficiente para problemas de mayor tamaño. Referimos al citado artículo para más detalles.

4. Planificación de flotas

La planificación de flotas es el segundo paso dentro del proceso completo de optimización de flotas. Partimos de unas rotaciones generadas por Comercial que aseguran la posibilidad de llevar a cabo la operativa con un número determinado de vehículos. Además, si se ha trabajado con ventanas de tiempo en la salida de los trayectos, el proceso de dimensionado ha fijado la hora de salida de cada trayecto. Esa hora de salida ya no se puede cambiar porque es muy probable que esos horarios ya estén en conocimiento del cliente y que ya estén vendidos. El objetivo del proceso de planificación es indicar qué vehículo debe realizar cada trayecto. Los datos de entrada son, por una parte los trayectos, y por otra, los vehículos, incluyendo las inactividades programadas de cada uno. La información que genera el proceso de planificación es la asignación de cada trayecto a un vehículo, lo que constituyen las rotaciones de cada vehículo, que a menudo se plasman en las hojas de ruta del vehículo. Estas hojas de ruta son la secuencia de actividades programadas para un vehículo en un periodo de tiempo.

A menudo, la planificación de flotas consiste en la asignación de rotaciones a vehículos: se asigna cada una de las rotaciones generadas en el dimensionado a un vehículo. Este es un problema sencillo que solo debe tener en cuenta que el tipo de vehículo asignado a la rotación

es del tipo de vehículo para el que se creó la rotación, y que la planificación de cada vehículo es continua con su situación del periodo anterior al que sigue el actual periodo de planificación.

Pero existen situaciones en las que las rotaciones generadas por el proceso de dimensionado pueden ser mejoradas en términos de coste, lo que constituye el verdadero concepto de una planificación de flotas. En el dimensionado se trabajaba con tipos de vehículos y no se hacía distinción entre ellos. Si dentro de un mismo tipo de vehículo no todos los vehículos son iguales, no generarán los mismos costes al realizar el mismo trayecto, por tanto, el coste total de la operativa va a depender de cómo se realice la asignación de trayectos a vehículos, con lo que surge de forma natural la optimización de costes de operación. Una característica que puede llevar a un diferente coste operativo de un trayecto en función del vehículo que se le asigna (dentro de un mismo tipo) es el consumo del vehículo. Si se trabaja con flotas combinadas (vehículos propios y vehículos subcontratados), en función del método de pago de la flota contratada, el coste total de la operativa puede cambiar en función de los trayectos asignados a los vehículos propios y a los subcontratados.

Otro factor que hace que a menudo no se puedan asignar directamente las rotaciones generadas por el proceso de dimensionado a los vehículos son los procesos de mantenimiento, que pueden no ser conocidos en el momento del diseño del plan comercial.

Las ventanas de tiempo son una opción de optimización importante en el proceso de dimensionado, y también puede ser utilizado en un proceso de planificación, si es una opción el definir la hora de salida de un trayecto para minimizar los costes operativos.

Un aspecto muy importante en cualquier operativa de transporte de viajeros y mercancías son los retrasos, que marcan la calidad del servicio percibida por el cliente. En dos planificaciones diferentes de una misma operativa, la sensibilidad a los retrasos es diferente. Se define la sensibilidad al retraso como el margen de tiempo del que dispone un vehículo para retrasarse en un trayecto sin que afecte al siguiente.

Una tarea muy importante a planificar son las tareas de mantenimiento programadas de los vehículos. Ciertas operaciones de mantenimiento se pueden realizar en cualquier estación y se realizan antes de la salida de cada trayecto, por lo que no es necesario tenerlas en cuenta como actividades a planificar, sino que deben ser consideradas como parte de la escala en la estación. Existen otras tareas de mantenimiento de mayor duración que sí deben ser tenidas en cuenta a la hora de realizar la planificación. Además de la duración de la operación de mantenimiento, el otro factor que afecta a la planificación es el lugar donde se encuentran las instalaciones donde se deben realizar las operaciones de mantenimiento. A veces las instalaciones se encuentran en las estaciones o próximas a las estaciones desde donde se realizan los trayectos, con lo que es importante hacer coincidir la llegada de un trayecto comercial con el comienzo de una operación de mantenimiento, para evitar realizar trayectos en vacío para realizaciones de mantenimiento porque significa incurrir en costes. A veces las operaciones de mantenimiento se realizan en instalaciones que no coinciden con estaciones por lo que no se pueden evitar esos trayectos especiales para realizar operaciones de mantenimiento.

Las operaciones de mantenimiento de los vehículos pueden ser una entrada al sistema, o debe planificarlas el sistema, contando con la capacidad de las instalaciones de mantenimiento. Si debe planificarlas el sistema, las operaciones de mantenimiento podrán tener un comienzo y duración fijos, o podrán tener una ventana de tiempos en su comienzo.

5. Resolución y resultados

El dimensionado de flotas y la planificación de flotas tienen una estructura similar; en el primero se asignan tipos de vehículos, y en el segundo, se asignan los vehículos. La planificación tiene una serie de tareas predefinidas que son las inactividades, pero de cara a la resolución son tareas ya asignadas a un vehículo concreto. La dimensión del problema es mucho mayor en el caso de la planificación ya que se crean muchas más variables, ya que el número de recursos es mayor (tipos de vehículo frente a cantidad de vehículos). Por otra parte, en el dimensionado suelen existir una serie de ventanas de tiempos (única o varias) que dificultan la resolución del problema, y en la planificación las horas de salida estarán ya fijadas, lo que facilita, y mucho, la resolución del problema.

El modelo de ambos tipos de problema es lineal y se puede aplicar como técnica de resolución la programación lineal entera mixta (Integer Linear Programming, ILP), que es la técnica de resolución más utilizada para las diferentes variantes de este problema. La optimización por colonias de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO) fue introducida por Coloni, Dorigo y Maniezzo (1991) como una metaheurística para resolver problemas de optimización combinatoria. La observación de las hormigas en búsqueda de comida fue la inspiración para la resolución de los problemas de optimización. Las hormigas se comunican entre ellas sobre las fuentes de comida mediante una esencia aromática llamada feromona. Marcan el camino por el que pasaron con una cantidad de feromona que depende de la longitud del camino que lleva a la comida y de la calidad de ésta. Otras hormigas observan las estelas de feromona, que les sirve para guiarle hacia las mejores fuentes de comida. Este comportamiento de las hormigas sirve para resolver problemas de optimización combinatoria mediante simulación: las hormigas artificiales recorren el espacio de soluciones simulando a las hormigas reales recorriendo el entorno, los valores objetivo de las soluciones simulan la calidad de las fuentes de comida, y la memoria adaptativa corresponde a las estelas de feromona. ACO es una familia de algoritmos. Nosotros hemos aplicado ACS (Ant Colony System), Dorigo y Stützle (2004), en su versión estándar (sin realizar ninguna adaptación), frente a nuestro trabajo previo, Diego, González y Carrasco (2007), donde se aplicaba AS (Ant System), Dorigo y Stützle (2004), obteniendo mejores resultados. ACS difiere de AS en los siguientes puntos: primero, explota la experiencia acumulada por las hormigas durante la búsqueda de una forma más fuerte que AS a través del uso de una regla de selección más agresiva, segundo, la evaporación y el depósito de feromona solo tienen lugar en los arcos de la mejor ruta del algoritmo, y tercero, cada vez que una hormiga se mueve de un nodo i a otro j , elimina una cantidad de feromona en el arco (i,j) para aumentar la exploración de caminos alternativos.

Para realizar las pruebas, se han creado dos problemas de diferente tamaño: A con 106 trayectos, y B con 412 trayectos. Los dos problemas tienen definidas relaciones de precedencia. Se han definido tres tipos de vehículo en cada uno de ellos. Existen trayectos definidos para varios tipos de vehículo. Se han realizado cuatro tipos de prueba con cada problema: con y sin ventanas de tiempo en la salida, y aplicando ILP y ACS. Hemos usado la biblioteca GLPK, Markorin (2005) para resolver el problema mediante programación lineal.

Los resultados de las pruebas se muestran en la Figura 16. En los problemas sin ventanas de tiempo en la salida, ILP presenta mejor rendimiento que ACS, y es preferible porque ofrece la solución óptima. Esto es así para las instancias A y B, donde ILP encuentra el óptimo antes que ACS. En el problema A, todas las ejecuciones de ACS encuentran el valor óptimo, mientras que en el problema B (de mayor tamaño), ACS no siempre encuentra el valor óptimo, siendo el peor resultado obtenido del 4% sobre el valor óptimo.

En los problemas con ventanas de tiempo en la salida, ILP necesita más tiempo para encontrar la primera solución entera, lo que lo hace más lento que ACS. ILP mejora la solución muy lentamente y necesita mucho tiempo para terminar, lo que la convierte una técnica no muy práctica. En cambio, ACS mejora continuamente la solución, pero no siempre encuentra el óptimo. La peor ejecución de ACS se queda a un 5% de la solución óptima. Esta solución óptima se encontró mediante ILP tras una ejecución de varios días.

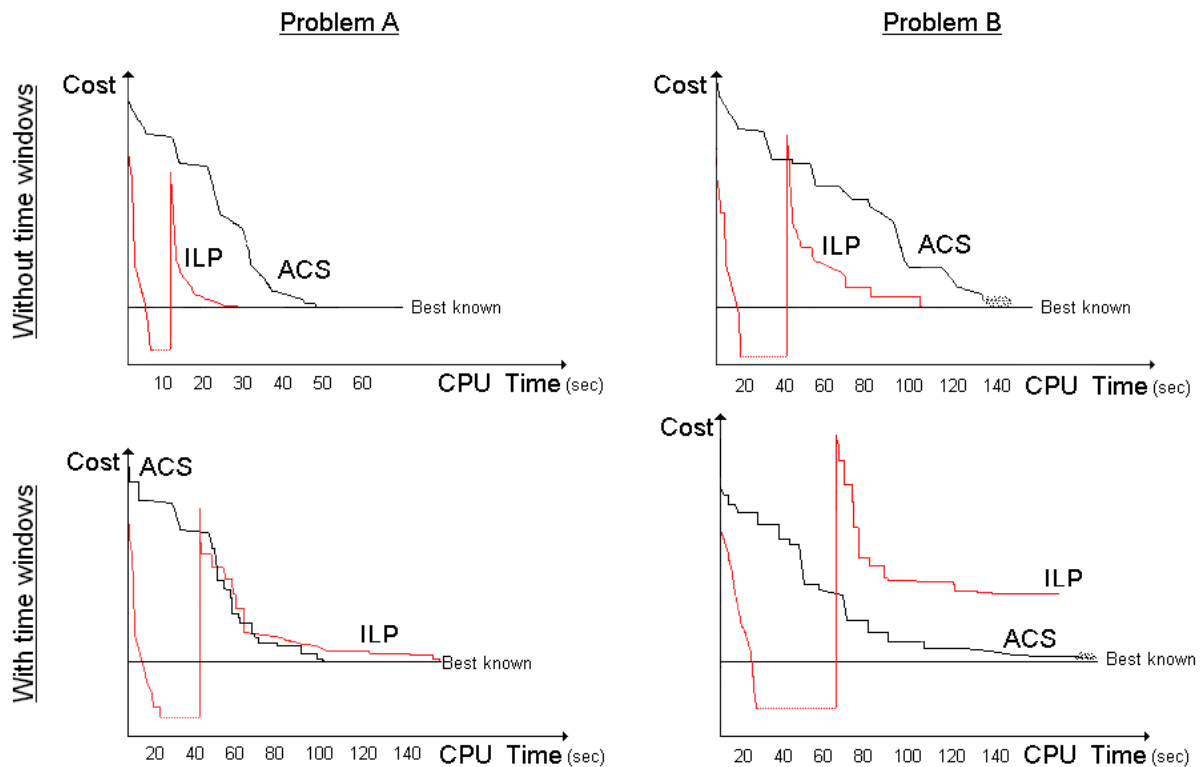


Figura 16. Resultados de los problemas de prueba

6. Conclusiones

Un sistema logístico avanzado en la operación de una empresa de transporte de viajeros necesita de sistemas de optimización que, utilizando un enfoque científico, sean capaces de ofrecer la mejor forma de operar, en función de las condiciones de entrada fijadas. El sistema logístico avanzado pasa por diferentes fases que deben ser totalmente continuas de cara a obtener el mejor resultado global de la empresa.

Se ha desarrollado un sistema de resolución basado en ACS (Ant Colony System) que ofrece muy buenos resultados y se vuelve más competitivo que la programación lineal entera mixta cuando crece el tamaño del problema.

Referencias

Bélanger, N.; Desaulniers, G.; Soumis, F.; Desrosiers, J. (2006). "Periodic airline fleet assignment with time windows, spacing constraints, and time dependent revenues". *European Journal of Operational Research*, 175(3):1754-1766.

Bélanger, N.; Desaulniers, G.; Soumis, F.; Desrosiers, J. (2006b). "Weekly airline fleet assignment with homogeneity". *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(4):306-318

Colomi, A., Dorigo, M., Maniezzo, V. (1991). "Distributed optimization by Ant Colonies". In F. Varela, and P. Bourguine (eds.), *Proc. Europ. Conf. Artificial Life (ECAL '91)*, pages 134-142, Elsevier Publishing.

Diego Martín, F.J; González Manteca, J.A.; Carrasco Arias, J. (2007). "Análisis del problema de asignación de flotas flexible con ventanas de tiempo discretas, duración variable, preferencias de salida y relaciones de precedencia. Optimización mediante colonias de hormigas". *XI Congreso Internacional de Ingeniería de Organización (CIO 2007)*. Madrid.

Dorigo, M., Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press. Cambridge.

Gambardela, L.M.; Rizzoli, E.A.; Oliverio, F.; Casagande, N.; Donati, A. V.; Montemanni, R.; Lucibello, E. (2003). "Ant Colony Optimization for vehicle routing in advanced logistics systems". *Proceedings of MAS 2003 – International Workshop on Modelling and Applied Simulation*, Bergeggi, Italy, pages 3-9, 2-4.

Götz, S.; Grothklgas, S.; Kliever, G.; Tschöke, S. (1999). „Solving the Weekly Fleet Assignment Problem for Large Airlines". *III Metaheuristics International Conference (MIC '99)*. Angra dos Reis, Brazil.

Ioachim, I.; Desrosiers, J.; Soumis, F.; Bélanger, N. (1999). "Fleet assignmnet and routing with schedule synchronization constraints". *European Journal of Operational Research*, 119(1):75-90.

Markorin, A. (2005). *GLPK: GNU Lineal Programming Kit*. Available at www.gnu.org.

Mathaisel, D.F. (1996). "Decision Support for Airline System Operations Control and Irregular Operations". *Computers and Operations Research*, 23(11):1083-1098.

Moudani, W.; Mora-Camino, F. (2000). "A dynamic approach for aircraft assignment and maintenance scheduling by airlines". *Journal of Air Transport Management*, 6(4):233-237

Sherali, H.D.; Bish, E.K.; Zhu, X. (2005). *Airline fleet assignment concepts, models and algorithms*. Grado Department of Industrial and Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute, USA.

Suhl, U.; Suhl L.M. (1999). *Solving Airline-fleet Scheduling Problems with Mixed-integer Programming*. Operational Research in Industry. Macmillan.