

# Aplicación de la metodología GRASP al problema de Rutificación de Vehículos (VRP)

## Application of GRASP methodology to Vehicle Routing Problem (VRP)

Priore P<sup>1</sup>, Martínez C, Villanueva V, Lozano J, Fernández I

**Abstract (English)** This paper first analyzes the performance of different methodologies to solve a MDVRP and VRPTW problem. Afterwards, the use of the GRASP heuristics is chosen and applied to a real and complex –due to its size– case. The outcome is in an improvement in the use of the space of the vehicles and a streamlined routes resulting in a decrease in transportation costs.

**Resumen (Castellano)** En este trabajo se analiza, en primer lugar, el comportamiento de distintas metodologías a la hora de resolver un problema de rutas del tipo MDVRP y VRPTW. Tras ello, se opta por la utilización de la heurística GRASP aplicándola a un caso real y complejo por sus dimensiones. El resultado es una mejora en la utilización del cubicaje de los vehículos y una racionalización en las rutas que se traducen en un descenso de los costes de transporte.

**Keywords:** Route Calculation, Artificial Intelligence, Heuristics; **Palabras clave:** Cálculo de Rutas, Inteligencia Artificial, Heurísticas

## 1.1 Introducción

La intención del presente trabajo es la de presentar el subproyecto desarrollado dentro del proyecto SITIM<sup>2</sup>. En el mismo, se trata de estudiar, evaluar y desarro-

---

<sup>1</sup> Paolo Priore (✉)

Grupo de Ingeniería de Organización (GIO). Dpto. de Administración de Empresas de la Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Campus de Viesques, s/n, 33204 Gijón, Spain  
e-mail: priore@uniovi.es

<sup>2</sup> *Análisis, desarrollo y evaluación de Sistemas Inteligentes de Transporte Intermodal*. Proyecto MFOM-08-E12/08 del *Subprograma para la Movilidad Sostenible y el Cambio Modal en el Transporte* del Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

llar metodologías y sistemas que permitan mejorar el Transporte Intermodal a través del conocimiento científico y tecnológico. Para ello, el proyecto cuenta la involucración de un variado número de actores, entre los que se encuentran: Grupos de Investigación de diversas universidades españolas, estamentos públicos relacionados con la Logística y el Transporte y empresas privadas de dichos sectores. En el subproyecto desarrollado, la idea a investigar e implementar, era la de cómo las técnicas de optimización operativa y de cálculo de rutas podrían ayudar a un operador logístico a ser más efectivo y eficiente. Para ello, contamos con el apoyo de una de las empresas participantes, la cual nos facilitó valiosa información y nos sirvió de nexo entre la investigación y la aplicación de los resultados obtenidos sobre la operativa real de una empresa de estas características.

## **1.2 Antecedentes**

Como resultado de una primera fase de investigación, se publicaron las pesquisas y hallazgos realizados en la literatura científica. La investigación se materializó en varios artículos: De la Fuente et al. (2011) y Pino et al. (2011) publicados en la *5<sup>th</sup> Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XV Congreso de Ingeniería de Organización*, celebrados en Cartagena (Murcia); y Pino et al. (2011) en el *ICAI – WORLDCOMP'11*, celebrado en Las Vegas, Nevada (EEUU). En los mismos se realizaba una revisión y estado del arte sobre los diferentes algoritmos que habían sido empleados para resolver problemas similares al que se había propuesto. Fundamentalmente, versaban sobre problemas del tipo VRP (Vehicle Routing Planning) y técnicas de resolución heurística.

### ***1.2.1 Primera Aproximación***

En un primer momento, se evaluaron y estudiaron los algoritmos exactos y los resultados obtenidos de su aplicación en la resolución de problemas VRP y de Cálculo de Rutas. En general, presentan un buen desempeño cuando se aplican restricciones que permiten acotar la búsqueda de soluciones. Por lo tanto, se tornan computacionalmente complejos cuando el número de nodos alcanza una cifra considerable. A pesar de que autores como Kontoravdis y Bard (1995) proponen su uso para la evaluación del desempeño de otros algoritmos, se llegó a la conclusión de que, en un problema como el planteado (numerosos clientes a evaluar y varias restricciones), se hace necesario el empleo de otro tipo de técnicas.

Esas técnicas estaban relacionadas, dadas las características del problema, con lo que se conoce como *Heurística* y que son las que habitualmente se emplean para la resolución de problemas de optimización donde se hace necesario encontrar una solución óptima en base a una serie de restricciones impuestas. Al centrarnos en

las mismas, acotamos el problema a un tipo conocido como VRP y más concretamente MDVRP (Multi Depot VRP) y VRPTW (VRP with Time Windows).

### ***1.2.2 Estudio de Heurísticas***

Una vez fijado como objetivo el desarrollo de una heurística que ayudase a solventar el problema planteado, se realizó un exhaustivo estudio de las posibles alternativas y su desempeño en otros problemas similares.

Se comenzó estudiando los algoritmos del tipo “Búsqueda Local”, así como aquellos basados en “Búsqueda Tabú”. Se encontraron varias soluciones interesantes, especialmente la propuesta por Pisinger y Ropke (2005) donde hacen uso de un *framework* mediante el que es posible resolver diversos tipos de problemas VRP.

En una línea parecida, se encontrarían los algoritmos de “Dos etapas”, buscando una mejora de las heurísticas, separando la resolución en dos fases, tal y como recogen Chao et al. (1995).

Otra alternativa estudiada ha sido el algoritmo GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), en el que se combinan diversas técnicas teniendo, además, la particularidad de que requiere de una fase inicial de construcción de posibles soluciones factibles.

Continuando con el estudio, se abordó en último lugar toda la familia de algoritmos que implican inteligencia colectiva o colaborativa; “Algoritmos Evolutivos”, “Swarm Intelligence” y “Multi-Agent”. Dentro de la categoría de Algoritmos Evolutivos, los cuales tratan de simular procesos de selección natural, destacan, sin lugar a duda, los algoritmos genéticos. En los mismos, es habitual la creación de una población de individuos (soluciones) que, mediante mecanismos de selección, van evolucionando hasta alcanzar la solución óptima. Son algoritmos ampliamente estudiados y para los que se puede encontrar mucha información y soporte. Es por ello, que su posible uso ha de ser tenido en cuenta cuando se pretende resolver problemas de optimización combinatoria. Debemos destacar el trabajo presentado por Blanton y Wainwright (1993) para problemas VRP.

Dentro de los algoritmos “swarm”, cuya base de funcionamiento es la imitación del comportamiento de sistemas de enjambres, destacan aquellos basados en Colonias de Hormigas. En los últimos años, han surgido numerosas investigaciones y su impacto ha sido elevado, como así atestiguan los trabajos de Dorigo et al. (1996) y Stützle et al. (2000). Así mismo, se ha extendido su empleo en la resolución de problemas de cálculo de rutas y VRP. Más recientemente, ha empezado a extenderse la investigación sobre el empleo de Algoritmos de Abejas (BA) en problemas de optimización; un campo muy interesante como se puede ver en algunos trabajos como el de Pham y Castellani (2009).

Ya por último, se investigó sobre la categoría de Sistemas Multi-Agente. Se trata de un campo con muchas posibilidades en la resolución de problemas con decisio-

nes complejas donde, así mismo, se necesita tener en cuenta diversas variables para la toma de las mismas. Se prevé un desarrollo aún mayor a medida que se puedan integrar soluciones de “Cloud Computing” y del “Internet de las Cosas”. Aunque para el problema a abordar no nos ha parecido una opción adecuada, en este campo debemos destacar trabajos como el de Baker (1998).

### 1.3 Definición del Problema

Para resolver el problema planteado, se ha utilizado la información aportada por uno de los socios del proyecto SITIM, se trata de una empresa logística de gran importancia a nivel nacional cuyo cometido es el transporte de vehículos tanto a nivel nacional como a nivel internacional.

La empresa tiene una flota compuesta por, aproximadamente, 270 camiones que no están centralizados o asignados a una zona o base determinada. Aun así, existen unos tipos de camiones llamados “Capilares”, que son los encargados de hacer los transportes provinciales.

El objetivo que se persigue con esta aplicación es la maximización de la carga de los camiones (al menos un 98% de los mismos). Hasta este momento los “operadores de tráfico” son los encargados de gestionar las cargas y las rutas de los camiones. Hay un total de 9 operadores y cada uno atiende una determinada zona geográfica.

La principal tarea del Operador es la de buscar cargas para los camiones en función de su localización, es decir, encontrar trabajo para los camiones y evitar que no sean rentables (bajo coeficiente de carga y realizar Km. en vacío).

Al ser una empresa de gran alcance, es importante para ellos la zonificación y por tanto han dividido su área de actuación en 16 zonas logísticas. Aunque la distribución (carga de vehículos) en sí, habitualmente se realiza desde puntos determinados, pero se contempla también la recogida de vehículos durante las rutas de entrega; bien sea de concesionarios, rent-a-car, campas,...

Los pedidos van entrando al sistema de manera escalonada y, según van entrando, los operadores de carga van organizando las cargas para asignarlas a los camiones según los criterios correspondientes. Por lo tanto, debido a esta operativa, a un mismo cliente le podrían llegar vehículos (pedidos) en rutas (camiones) diferentes.

Existen también los llamados *puntos de recarga óptimos* que son unas zonas determinadas, que están señaladas como puntos en los que habitualmente existen cargas disponibles. Por lo tanto, en la medida de lo posible se intentará que los camiones o las rutas estén cercanas o pasen por estos citados puntos.

Además, debido a la experiencia que tienen, intuyen que los puntos que en un momento determinado podrían presentar cargas para asignar; en las cercanías de estas zonas será más sencillo para los operadores “buscar” cargas para los camiones.

El problema por tanto radica en el gran trabajo que supone al operador de tráfico el generar manualmente todas estas tareas con la consiguiente posibilidad de errores al olvidar o hacer una mala gestión de una de las cargas y entregar fuera de tiempo con una penalización alguna de las cargas solicitadas.

## 1.4 Solución Adoptada

Tras hacer una investigación sobre aquellos algoritmos existentes que pudiesen ser adecuados para la resolución del problema mencionado se optó por GRASP.

El algoritmo GRASP consta de una serie continua de iteraciones, en las cuales trata de seleccionar una buena solución al problema. Para no dejarse llevar por lo que se conoce “criterio goloso” y elegir equívocamente un máximo local, el algoritmo GRASP crea una lista restringida de candidatos usando un factor aleatorio. Es precisamente esta aleatoriedad la que hace del algoritmo GRASP una alternativa con superior eficacia respecto a una gran cantidad de algoritmos heurísticos.

La cantidad de iteraciones “n” que se realizarán con el algoritmo GRASP será determinada antes de la ejecución del experimento principal. Se realizará un proceso de calibración del algoritmo GRASP, esto supondrá la ejecución del algoritmo GRASP varias veces, cada una con un diferente valor de “n” hasta determinar en promedio, qué valor halla buenos resultados y en un tiempo aceptable.

El algoritmo GRASP también hace uso de un parámetro importante en la creación de la lista restringida de candidatos. Este parámetro está simbolizado por  $\alpha$  y se le conoce como “*factor de relajación*”. El valor de este parámetro también será hallado con un proceso de calibración previo al experimento principal de la investigación, pero se tendrá en cuenta valores previos utilizados en aplicaciones similares a la presente.

Para ello se empieza a construir rutas en función de las localidades de destino que existen para los diferentes pedidos. En dicha construcción se va evaluando cómo sería la función de coste dependiendo de si se introduce un pedido (que va a una ciudad o a otra) u otro en la ruta. La función de coste sobre la que se toma la decisión está en función del factor de carga que tiene el camión y la distancia que debe recorrer hasta la citada ciudad. A su vez existen unas variables que le dan un peso u otro dependiendo de la importancia que se quiere que se tenga:

$$C = A \cdot \frac{1}{FC} + B \cdot d_{ij} \quad (1.1)$$

donde  $C$  es el coste que representa introducir una determinada ciudad en la ruta,  $A$  y  $B$  son las variables que dan diferentes pesos,  $FC$  es el factor de carga y  $d_{ij}$  es la distancia entre la ciudad  $i$  y la ciudad  $j$ .

A la hora de presentar los resultados que se pudieran obtener de la aplicación del algoritmo y que pudiera ser evaluado de una manera más sencilla y rápida por el personal de la empresa colaboradora en el proyecto, se desarrolló una aplicación

web. En la misma, se facilita la introducción de datos por un usuario, la selección de parámetros del algoritmo, así como la validación de los resultados que se van obteniendo. Así mismo, los resultados pueden ser exportados a formato Excel, de manera que puedan ser evaluados por el personal cualificado. Esto nos permitió involucrar al equipo de la empresa y obtener indicaciones e información muy valiosa de cara a introducir mejoras en el modelo teórico.

Datos validados a exportar( 2 rutas)

Datos Excel para analizar funciones de coste

Identificador vehículo	Modelo	Ubicación origen	Localidad origen	Ubicación destino	Localidad destino	Zona logística destino	Código lote	Código camión
1049GB0	FIAT BRAVO	BAL TARRAGONA	Tarragona	AUTO 88 SA	Barcelona	CATALUÑA		158
USYZ2B1VCBL113140	HYUNDAI IX35	BAL TARRAGONA	Tarragona	MASTERCLAS AUTOMOCCION (C/ Ciudad De La Alagona)	Barcelona	CATALUÑA		158
TMATP81CABJ036382	HYUNDAI I20	BAL TARRAGONA	Tarragona	PUERTO BARCELONA	Barcelona	CATALUÑA		158
KMHSH81XCBU770859	HYUNDAI SANTA FE	BAL TARRAGONA	Tarragona	PUERTO BARCELONA	Barcelona	CATALUÑA		158
KMHSH81XCBU777796	HYUNDAI SANTA FE	BAL TARRAGONA	Tarragona	PUERTO BARCELONA	Barcelona	CATALUÑA		158
MALAM51BAM925089	HYUNDAI I10	BAL TARRAGONA	Tarragona	PUERTO BARCELONA	Barcelona	CATALUÑA		158
KPTADJ1SSBP002771 (único)	SSANGYONG KORANDO C200	BAL TARRAGONA	Tarragona	APM MOTORS 2010 SL	Viladecans	CATALUÑA		158
NLHBA51BAG2063333 (único)	HYUNDAI I20	BAL TARRAGONA	Tarragona	PENEDESCAR SA	Via Franca Del Penedes	CATALUÑA		158
KNAEES1ACT080787	KIA PICANTO	BAL TARRAGONA	Tarragona	PUERTO BARCELONA	Barcelona	CATALUÑA		45
USYZ2B1VABL11206	HYUNDAI IX35	BAL TARRAGONA	Tarragona	COBO SA 5	Sant Adria De Besos	CATALUÑA		45
USYZ2B1VCBL114809	HYUNDAI IX35	BAL TARRAGONA	Tarragona	COBO SA 5	Sant Adria De Besos	CATALUÑA		45
KMHSH81XCBU770820	HYUNDAI SANTA FE	BAL TARRAGONA	Tarragona	COBO SA 5	Sant Adria De Besos	CATALUÑA		45
USYHB316ACL055230	KIA CEEED	BAL TARRAGONA	Tarragona	AUTOMOBILS AR MOTORS SL (SANT BOI DE LLOBREGAT)	Sant Boi De Llobregat	CATALUÑA		45
TMAEB811ABJ069141	KIA VENGA	BAL TARRAGONA	Tarragona	AUTOMOBILS AR MOTORS SL (SANT BOI DE LLOBREGAT)	Sant Boi De Llobregat	CATALUÑA		45
TMAEB811ABJ069575	KIA VENGA	BAL TARRAGONA	Tarragona	AUTOMOBILS AR MOTORS SL (SANT BOI DE LLOBREGAT)	Sant Boi De Llobregat	CATALUÑA		45
USYPC81SACL031157 (único)	KIA SPORTAGE	BAL TARRAGONA	Tarragona	INTEGRAL CAR	Terrasa	CATALUÑA		45

Rutas exportadas : 2  
 Pedidos enviados : 16  
 Pedidos totales : 207  
 % enviados : 7.728485599033816 %

Exportar a fichero Excel | Deshacer la última exportación

Fig. 1.1 Captura de pantalla con el resultado una configuración de rutas para los camiones disponibles en las que se especifica el detalle de la carga para cada uno de ellos.

## 1.5 Resultados Obtenidos

La primera mejora que podría experimentar la empresa, es que se produciría un ligero descenso del coste de transporte. Esto, obviamente, llevaría a una mejora de los márgenes de venta. Esta mejora del coste, viene dada por una mejor optimización de la carga en combinación con la elección de la ruta. Es decir, al realizar combinaciones de cargas a transportar y rutas a seguir, se consigue que los camiones vayan más cargados en los diferentes tramos que componen una ruta y, por lo tanto, su rentabilidad por kilómetro recorrido mejore. Este hecho se puede apreciar en los Percentiles recogidos en la tabla 1.1. Estos percentiles, hacen referencia al porcentaje de tramos para el total de rutas creadas (25%, 50% ó 75%) se encuentran dentro del rango dado por el valor. Del mismo modo, los costes reflejan bajadas en los mismos. En el cálculo del citado coste, se ha tenido en cuenta el coste por kilómetro del mismo, introduciendo una serie de pesos que ponderan según la cantidad de carga que lleve el camión. De esta forma, el coste aumenta a medida que se deja capacidad de carga sin usar.

Otro asunto importante para la empresa y del que se ha conseguido una cierta mejora, es el poder repartir coches periféricos; estos son aquellos coches que van a destinos poco visitados. Por tanto, para que su envío no suponga una medida anti-económica, se debe analizar las posibles combinaciones para introducirlo en una ruta y que su inclusión no suponga realizar un envío antieconómico. Se aprecia una mejora en el ratio de vehículos de este tipo entregados.

Así mismo, reseñar que se ha mejorado la reubicación de los camiones. Dado que los camiones no deben de volver a un punto preestablecido, debe de buscarse que la ruta termine en un punto que se encuentre lo más próximo posible a otros puntos preestablecidos como de alta densidad de tráfico. Con ello se ha conseguido una disminución de los kilómetros en vacío recorridos.

**Tabla 1.1** Comparación de parámetros entre la solución realizada por el operador y la realizada por el algoritmo.

	Solución Manual <sup>1</sup>	Solución con GRASP
Nº de camiones	17	18
Nº de Vehículos		140
Carga Mínima		37.3
Carga Percentil 25		61.8
Carga Percentil 50		84.4
Carga Percentil 75		91.3
Carga Máxima		98
Coste		16310
Coches periféricos entregados		12
Kilómetros recorridos en vacío		1020

<sup>1</sup>Solución llevada a cabo según operativa actual en la empresa.

## 1.6 Conclusiones y Mejoras

Una primera conclusión que debemos exponer es que el poder colaborar con una empresa privada ha servido para poder tener gran cantidad de datos reales y, por tanto, tener la oportunidad de testear la aplicación en diversos escenarios reales y cotidianos. Se ha observado la reducción de costes derivado de la optimización de las cargas en función de las rutas, si bien, sería deseable analizar el impacto en el largo plazo de la condición de forzar un camión a que concluya su ruta en un punto determinado.

Por otro lado, estaría pendiente la implementación de una mejora en el manejo de las restricciones sobre ventanas temporales. Es un dato que para las empresas transportistas es importante dado que, en sus contratos de servicio tienen establecidos bonificaciones y penalizaciones por el cumplimiento de determinados plazos

de entrega. En el algoritmo implementado, tan sólo se daba prioridad a aquellas cargas cuya fecha de vencimiento estuviera próxima, pero no se hacía un control de las fechas reales de entrega.

Por último, señalar que derivado del impacto económico sobre los costes, que el empleo del algoritmo tiene, sería deseable establecer una metodología para llevar a cabo un estudio sobre el impacto en la reducción de la contaminación derivada de la optimización del coeficiente de llenado de los camiones y la minimización de los kilómetros recorridos.

## 1.7 Referencias

- Baker, AD (1998): "A survey of factory control algorithms that can be implemented in a Multi-Agent Heterarchy: Dispatching, Scheduling and Pull". *Journal of Manufacturing Systems*, vol.17(4), pp.297-320.
- Blanton, JL.; Wainwright, RL. (1993): "Multiple vehicle routing with time and capacity constraints using genetic algorithms". *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*. San Francisco: Morgan Kaufmann, pp. 452-459.
- Chao, I.M.; Golden, B.L.; Wasil, E. (1995): "An improved heuristic for the period vehicle routing problem". *Networks*, vol.26 (1), pp.25-44.
- Davidsson, P.; Henesey, L.; Ramstedt, L.; Törnquist, J.; Wernstedt, F. (2005): "An analysis of agent-based approaches to transport logistics". *Transportation Research part C-Emerging Technologies*, vol.13(4), pp. 255-271.
- De la Fuente D, Lozano J, Ochoa E, Díaz M (2011) Estado del arte de algoritmos basados en colonias de hormigas para la resolución del problema VRP. XV Congreso Ingeniería de Organización. CIO 2011.
- Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colomi, A. (1996): "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol.26 (1), pp. 29-41.
- Kontoravdis, G.; Bard, J.F. (1995): "A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows". *ORSA Journal on Computing*, vol.7 (1), pp.10-23.
- Pham, D.T.; Castellani, M. (2009): "The Bees Algorithm: modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems". *Proc. Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of mechanical Engineer Science*, vol. 223 (12), pp. 2919-2938.
- Pino R, Lozano J, Martínez C, Villanueva V (2011) Estado del arte para la resolución de enrutamiento de vehículos con restricciones de capacidad. XV Congreso Ingeniería de Organización. CIO 2011.
- Pino R, Villanueva V, Martínez C, Lozano J, Del Pino B, Andrés García C (2011) Heuristic Solutions to the Vehicle Routing Problem with Capacity Constraints. *ICAI-Worldcomp'11*.
- Pisinger D.; Ropke S. (2005): "A general heuristic for vehicle routing problems". *Computers & Operations Research*, vol. 34 (2007), pp.2403-2435.
- Stützle, T; Hoos, H (2000): "MAX-MIN ant system. *Future Generation Computer Systems*", vol.16 (8), pp.889-914.