

Utilización del sistema GALILEO para la optimización del acarreo del transporte intermodal

Alejandro Escudero Santana¹, Jesús Muñozuri Sanz¹, Joaquín Fernández Valverde¹

¹ Dpto. de Ingeniería de Organización. Escuela Superior Ingenieros. Universidad de Sevilla. Avd. Descubrimientos s/n 41092. Sevilla. aescudero@esi.us.es, munuzuri@esi.us.es, joaferval@esi.us.es

Palabras clave: transporte intermodal, acarreo, metaheurísticas, tiempo de transito estocásticos

1. Introducción

El transporte por carretera ha sido y sigue siendo el predominante para el movimiento interestatal de mercancías. Sin embargo, la elevada congestión a las que se encuentran sometidas muchas vías y la necesidad de encontrar modos de transportes más saludables ha hecho que los distintos gobiernos se planteen la intermodalidad como una alternativa.

Para que la intermodalidad sea una realidad en trayectos inferior a los 700km se hace necesaria una reducción de sus costes. Casi el 40% de los costes de dicho modo de transporte se encuentran localizados en los trayectos finales, por tanto una adecuada gestión de los mismos podría hacer de la intermodalidad un modo mucho más competitivo.

Existen varios estudios que tratan el tema de la gestión centralizada de las tareas de acarreo, siendo los pioneros Morlok y Spasovic (1994) que estudiaron el ahorro que produciría la cooperación entre empresas. Los principales estudios siguen las investigaciones de De Meulemeester et al (1997) y Bodin et al (2000) resolviendo el problema desde una perspectiva estática y determinista (Wang y Regan, 2002; Cheung y Hang, 2003; Smilovik, 2006). Dicha aproximación puede ser satisfactoria en acarreos de larga distancia, sin embargo cuando estos movimientos se realizan en los alrededores de grandes centros urbanos se hace necesario contemplar la aleatoriedad de los tiempos de transito y el posible dinamismo en la asignación de las tareas. Algunos trabajos además han permitido la generación aleatoria de tareas (Bent and Van Hentenryck, 2004; Bertsimas, 1992; Gendreau et al, 1995) o el dinamismo en su asignación (Bent y Van Hentenryck, 2004; Psaraftis, 1995; Wang et al, 2007). Sin embargo, es muy difícil encontrar trabajos que consideren aleatoriedad en los tiempos de transito (Laporte et al, 1992), que sería la situación apropiada cuando las tareas de drayage se desarrollan cerca de los grandes centros urbanos. Cheung and Hang (2003) y Cheung et al (2005) tienen en consideración características estocásticas y dinámicas del problema de drayage, solucionándolo a través de una heurística de ventanas deslizantes, pero esta aleatoriedad solo afecta a la duración de las tareas y no a los tiempos de desplazamientos entre diferentes tareas.

En el modelo que se plantea, se resuelve el problema del acarreo en una red con enlaces cuya duración es estocástica. Además, el modelo tiene la posibilidad de incorporar tareas flexibles, en las que existen diversas posibilidades para su realización, como es en el caso del movimiento de contenedores vacíos. El modelo tiene un carácter dinámico al ser capaz de reasignar tareas a medida que se conocen datos con mayor certeza gracias a sistemas de posicionamiento como es el caso de GALILEO.

2. Descripción del problema del acarreo diario estocástico

El problema de optimización de las operaciones del drayage pueden ser modelados como un Problema de Rutado de Multi-Recursos con Tareas Flexibles, MRRP-FT (Smilowitz, 2006). En un MRRP-FT múltiples recursos han de ser utilizados para completar una serie de tareas, operaciones de acarreo, que se deben de realizar. De una manera más formal se define el MRRP-FT de la siguiente manera:

- DADO un conjunto de tareas, tanto completamente definidas (Tareas bien definidas) como parcialmente definidas (Tareas Flexibles), que han de realizarse dentro de una determinada ventana temporal y que requieren de algunos recursos durante un tiempo determinado (probabilístico o determinista); una flota de cada tipo de recurso; unas horas de operación en cada una de las localizaciones; y una red con tiempos de tránsito estocástico.

- ENCONTRAR el conjunto de rutas de todos los recursos que satisface todas las tareas a la vez que optimiza una función objetivo (minimizar los costes de operación) y cumple unas reglas de operación tanto para las tareas como para los recursos.

Por lo tanto, la asignación correcta de tareas a vehículos dependerá de la región donde se llevan a cabo las operaciones, de las características de cada una de las tareas, de los recursos de los que se dispone, de la información de la que se disponga respecto a los acontecimientos que vayan ocurriendo y de la función de costes pertinente. Todo y cada uno de estas características son descritas en mayor profundidad a continuación.

2.1. Región de operaciones

La región donde se lleva a cabo las operaciones de acarreo se representará a través de un grafo $G = (N, A)$ que representa el medio físico existentes en la zona que se ha de resolver el problema del acarreo. Los nodos $i \in N$ representarán las distintas facilidades que son de especial interés dentro del problema: terminales, depósitos y puntos de carga y descarga. Cada uno de esos nodos tiene asociado un tiempo para el movimiento de carga y descarga de los contenedores, τ_i^c y τ_i^d respectivamente. Entre cada par de nodos $i, j \in N$ existirá un arco $(i, j) \in A(i, j)$ que estará caracterizado por la distancia entre dichos nodos, d_{ij} . En esta región de operaciones la velocidad a la cual se puede circular por los arcos es una variable aleatoria discreta, $v = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{MAX}\}$ de la cual será conocida su distribución.

2.2. Tareas

Cada día se han de llevar a cabo una serie de tareas, T , la no realización de una de estas tareas supondrá una penalización. Las tareas de acarreo que se llevan a cabo pueden clasificarse en dos tipos básicos: tareas bien definidas, T_w , y tareas flexibles, T_f .

Las tareas bien definidas serán, por lo general, movimientos de contenedores cargados entre la terminal y los clientes, o viceversa. De cada una de estas tareas se tiene absoluta certeza tanto del origen, $o^t \in N$, como del destino, $d^t \in N$. Estas tareas bien definidas también podrían ser movimientos de contenedores de propiedad externa a la empresa que realiza el acarreo, en la que el cliente fija origen y destino.

Las tareas flexibles suelen ser la reubicación de contenedores vacíos. El consumidor de los servicios de acarreo necesita de la retirada o recibo de un contenedor vacío propiedad de la empresa que realiza el drayage, sin embargo al consumidor le debe ser indiferente y transparente la procedencia o destino del contenedor. Al presentar este tipo de tareas incertidumbre en alguno de sus extremos puede presentar un variado número de realizaciones posibles. Todas las tareas flexibles siempre podrán realizarse con los almacenes de los que

disponga la empresa de transporte; sin embargo, en muchas ocasiones resulta más económico la unión de tareas flexibles que se complementen. Si un consumidor requiere de la retirada de un contenedor vacío y otro consumidor requiere del recibo de otro contenedor vacío, puede resultar interesante enviar el contenedor de un consumidor a otro sin previo paso por el almacén, siempre y cuando los horarios en los que se desarrollarían dichas tareas hagan posible la unión. El conjunto de realizaciones posibles de una tarea flexible, $t \in T_f$, se denotará por $r \in R_t$.

El conjunto de todos los movimientos posibles se denotará por M . Dicho conjunto estará formado por todas las tareas bien definidas, más cada una de las posibles realizaciones de las tareas flexibles que no son coincidentes.

Cada tarea $t \in T$ tendrá asociada una ventana temporal que limita el tiempo en el que estas pueden ser realizadas. Las ventanas podrán ser definidas de dos maneras: por el inicio de la tarea, $[a_{ini}^t, b_{ini}^t]$, o por la finalización de la misma, $[a_{fin}^t, b_{fin}^t]$. Que la ventana esté referida al inicio de la tarea o a la finalización de la misma dependerá de la tarea en cuestión a realizar. Si se necesita recoger un contenedor de la terminal la ventana estará definida al inicio de la tarea, sin por el contrario la tarea consistiera en la entrega en la terminal la ventana estaría fijada al final de la tarea.

Las ventanas temporales pueden tener una cierta flexibilidad, aunque lo idóneo sería que la tarea se realizara en los tiempos comprendidos entre los instantes definidos por la ventana temporal. Puede que sea posible realizar la tarea con anterioridad o posterioridad a los límites de la ventana temporal. Es hecho dependerá de cada una de las tareas en cuestión y asumiendo un gasto extra por no realizar la operación en el momento fijado.

Por ejemplo, en el caso de tareas de envío de contenedores a la terminal intermodal, donde después este será transportado bien por barco bien por tren hacia otra terminal, el contenedor podría llegar a la terminal con anterioridad a la hora que le hubieran fijado, si bien habría que pagar por el almacenamiento del mismo un precio proporcional al tiempo de estancia. Pero no se podría permitir que el contenedor llegara a la terminal con posterioridad a la ventana temporal, ya que se perdería la conexión con el tren o barco pertinente. En el caso de recogida de contenedores de la terminal, nunca podría empezar la tarea antes de la llegada de la mercancía a la terminal, pero la mercancía podría quedar almacenada en la terminal hasta que el transportista pudiera llegar a recogerla. Estos ejemplos demuestran que las ventanas temporales de las tareas pueden ser flexibles en un cierto grado, a costa de un coste extra. Por lo tanto la ventana temporal de este tipo de tareas estará íntimamente ligada a los horarios de llegada y partida de los barcos y trenes.

En el caso de tareas flexibles, las cuales representaban a movimientos de contenedores vacíos, serán los clientes los que fijaran el tiempo en los cuales se debe efectuar la recogida o entrega de dichos contenedores. Los clientes fijarán los márgenes en los que dicha tarea se debe realizar. Para este tipo de tarea se supone que no existe flexibilidad posible.

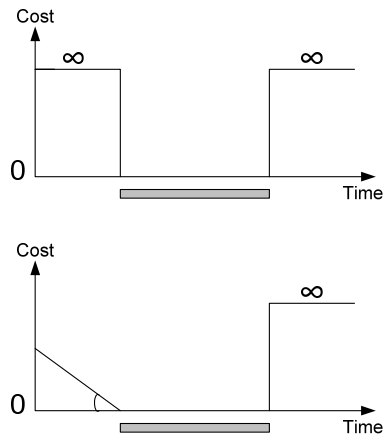


Figura 1: (arriba) ventana temporal de las tareas flexibles. (Abajo) ventana temporal de una tarea de envío de contenedor a la terminal

2.3. Recursos

Para la realización de todas estas operaciones de acarreo, se dispone de una serie de recursos: contenedores, vehículos y conductores. Se ha supuesto que todos los vehículos pueden realizar el movimiento de todos los contenedores, con esta simplificación se están considerando igual a todos los contenedores. Además se supondrá que el número de contenedores en el depósito y la capacidad de almacenaje del mismo son ilimitados, de esta forma cualquier tarea flexible a realizar podrá al menos tener una posible realización inmediatamente.

Aunque en una situación real un mismo vehículo podría ser conducido por varios operarios en diferentes turnos, se supondrá el par vehículo-conductor, V , como un todo. Esta simplificación no supone ninguna limitación, ya que si un vehículo opera con dos conductores, esto ocurrirá en horarios diferentes y se podrá considerar el primer turno como v_1 y el segundo turno como v_2 . Cada par $v \in V$ estará caracterizado por una localización donde empezará y terminará la jornada laboral. Los diferentes conductores tendrán asociados una hora de inicio y fin de la jornada, esta jornada puede ser flexible $[a_{ini}^v, b_{ini}^v]$, si bien no puede sobrepasar un número máximo de horas diarias, MAX_v .

2.4. El valor de la información en tiempo real

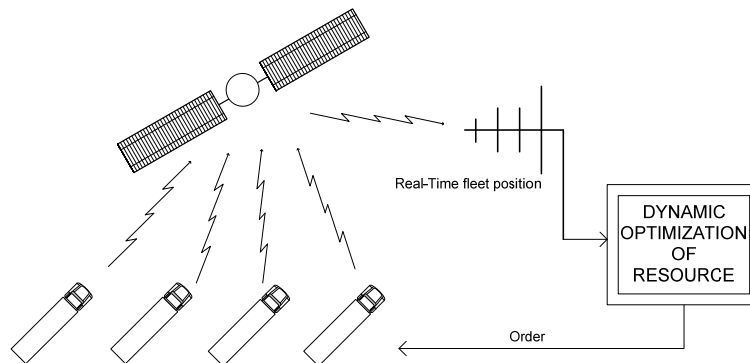


Figura 2: Optimización en tiempo real

Se dispondrá de un sistema de posicionamiento por satélite, por ejemplo Galileo, que proveerá de información en tiempo real sobre la posición de los vehículos. Esta información será usada para reoptimizar la solución en el caso que debido a la aleatoriedad en los tiempos de viaje, las condiciones del problema cambien respecto a lo que se tenía con anterioridad.

Esta reoptimización, o búsqueda de mejores soluciones, puede ser llevada a cabo o bien cada ciertos periodos, o bien si ocurre determinados eventos.

2.5. Los costes

Dependiendo la solución que se adopte, la realización de las tareas de acarreo incurrirán en unos costes u otros. Muchos son los costes reales que aparecen en este tipo de movimientos de contenedores, costes de mantenimiento de los vehículos, salarios de los conductores, costes del combustible, coste por almacenamiento, costes de seguros, tasas, sanciones,... por lo que se hace necesario simplificar los costes a considerar e intentar reflejar solo aquellos costes que realmente se verán afectados según la política de asignación de las tareas que se lleve a cabo. Por lo tanto los costes que serán contemplados son:

- Costes fijos por vehículos usados: en el caso que el vehículo salga del almacén o posición de inicio, se contabilizará un coste fijo de puesta en servicio de dicho vehículo. En el caso de que el vehículo no sea usado, no se contabilizará coste alguno. Es cierto, que incluso cuando el vehículo permanece parado durante un día de operaciones, el empresario deberá pagar un coste por el mismo. Sin embargo lo que nos interesa es el coste marginal de poner un vehículo más en movimiento de manera que el coste total empleado en la realización de las tareas sea mínimo. De esta forma estamos intentando disminuir el número de vehículos en ruta.

- Coste por distancia recorrida: de igual manera se impondrá un coste por kilómetro recorrido. Aunque es cierto que en el caso de vehículos de una flota propia los coste no depende solo de la distancia que recorre el vehículo (dependiendo también de las velocidades y hábitos de conducción del conductor, y de la carga que lleve el vehículo) implementar todos los factores supone una complejidad demasiado elevada para la mejora que produciría en los resultados. En caso que el vehículo sea una subcontrata esta aproximación se encuentra íntimamente unida a la realidad.

- Costes de espera por llegada temprana en la entrega o recolección tardía en la recogida de contenedores de la terminal: Como se ha comentado con anterioridad, las ventanas temporales en la terminal pueden presentar cierta flexibilidad. La entrega de un contenedor se puede realizar con anterioridad a la hora que nos detallen, así como la recogida con posterioridad. Sin embargo, a pesar de poder tener cierta flexibilidad será necesario pagar un coste de almacenaje, por el tiempo que el contenedor haya estado de más en la terminal.

- Coste de pérdidas de la tarea: Existen situaciones en los que la ventana de realización de la tarea no puede presentar flexibilidad, teniendo que realizarse de forma estricta en un límite determinado. Este hecho se ve claramente reflejado en la entrega de un contenedor en la terminal para ser luego movido en barco o en tren. Si el contenedor no llega a tiempo se pierde el siguiente eslabón de su cadena de transporte. Las llegadas tempranas a tareas con ventanas temporales no flexibles se penalizaran con un coste de espera. La llegada tardía a este tipo de situaciones se penalizará suponiendo la pérdida de la tarea e imputando un coste a la pérdida de dicha tarea.

3. Metodología de resolución

Como se comentará en la definición del problema, la metodología usada usará información en tiempo real para ir mejorando dinámicamente la solución encontrada. Por lo tanto, cuando el sistema detecta cambios, procede a una nueva búsqueda para intentar encontrar soluciones mejores a las que se disponía. Esto hace que las tareas asignadas a un vehículo, puedan cambiar a lo largo de la jornada laboral según la circunstancia.

La metodología sigue la lógica mostrada en la figura 3. Se dispone de una serie de tareas a realizar en el día, estas tareas pueden estar en tres estados diferentes: pendientes, en proceso o terminadas. Y se dispone también de una flota de vehículos, los cuales pueden encontrarse o bien ocupados, o con alguna tarea asignada o libres. De cada uno de estos vehículos se conoce la posición exacta. Al comienzo de la jornada laboral se ejecuta el algoritmo de búsqueda de la mejor solución posible. Este algoritmo asignará a cada vehículo una serie de tareas a realizar y un orden para realizar las mismas.

Sin embargo debido al carácter probabilístico de los tiempos de transito y de los tiempos de llegadas de los barcos y trenes, puede que la mejor solución al principio del día no sea la más adecuada transcurrido cierto tiempo. El cambio de las circunstancias puede hacer que la solución cambie. Por lo tanto cada cierto tiempo se evalúa de nuevo el algoritmo de búsqueda de la mejor solución con la finalidad de adecuar la solución a la situación real del momento. El momento de lanzamiento de una nueva búsqueda puede ser determinado de varias maneras:

- Cada cierto periodo fijo. Por ejemplo, cada 15min se busca una mejor solución.
- Cuando ocurre algún evento especial. Por ejemplo, se ha concluido una tarea, se conoce el cambio de horarios de un tren, se ha introducido una nueva tarea en la lista de tareas.
- Cuando la velocidad de un vehículo se desvía un porcentaje determinado respecto a la velocidad media esperada.

Tras la nueva búsqueda puede ser que se reasignen las tareas a otros vehículos. Hay que tener en cuenta que un vehículo que se encuentra ocupado en una tarea ha de terminar la tarea. Y por lo tanto necesitará un tiempo para poder ser asignado a una nueva tarea. Sin embargo un vehículo que ha sido asignado a una tarea pero todavía no ha empezado a realizar la misma, si puede ser cambiado de asignación.

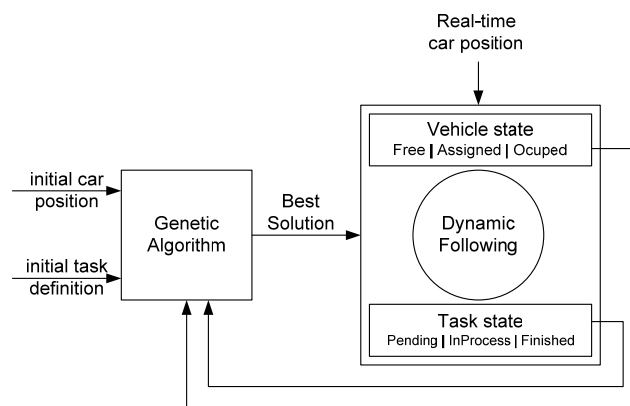


Figura 3: Metodología del dinamismo.

3.1. El algoritmo genético

Para la búsqueda de la mejor solución del problema estocástico del acarreo se ha usado un algoritmo genético (Ver algoritmo 1). Para conocer los principios de dicho algoritmo es recomendable la lectura de Goldberg y Holland (1988), en este trabajo se van a comentar solamente las particularidades del algoritmo empleado respecto al algoritmo básico.

Algoritmo 1: Genético

```
poblacion = GeneracionPoblacion (n_tareas, n_vehiculos, n_poblacion);  
for i=1:max_iter  
    fitness = Evaluacion (poblacion);  
    padres = Seleccion(poblacion, fitness, tam_seleccion,'TOP');  
    hijos = GeneticCross (padres, prob_cruce);  
    hijos = Mutacion (hijos, prob_muta);  
    poblacion = poblacion + hijos ;  
    fitness = Evaluacion (population);  
    morir = Seleccion (poblacion, fitness, tam_seleccion,'BOTTOM');  
    poblacion = poblacion – dead;  
end
```

En un algoritmo genético, cada una de las soluciones han de ser codificadas en un cromosoma. El cromosoma que representa cada una de las soluciones es igual al usado por Wang et al. (2007). En esta representación cada cromosoma esta compuesto por varios genes y cada gen representa a una tarea a realizar. Cada tarea es asociada a un gen de forma fija. Estos genes son caracterizados por 4 dígitos. El primero de los dígitos hace referencia al vehículo al que se le asigna la realización de la tarea, los siguientes tres dígitos son empleados para identificar en que orden cada vehículo completará todas las tareas que tiene asignadas. Realizando primero las tarea con el menor valor en esos tres dígitos. Por ejemplo, en el cromosoma mostrado en la tabla 1, al vehículo 1 le serían asignadas las tareas 1, 2 y 4, ya que el primer digito de los genes de esas tareas lo refleja. Y el vehículo realizaría las tareas en el orden 1→2→4, ya que estas son ordenadas de acuerdo con los 3 siguientes dígitos; en el caso del vehículo 2, las tareas que realizaría serían 3, 4 y 6, sin embargo el orden en el que se realizarán sería 3→6→5 (Ordenador por el valor de los 3 últimos dígitos del gen):

Tabla 1. Representación de los cromosomas

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.123 | 1.673 | 2.234 | 1.942 | 2.440 | 2.294 |

Los parámetros del algoritmo genético fueron probados con una batería de problemas, tras los resultados obtenidos se fijo la población en 60 individuos. Estos individuos eran evaluados atendiendo a los costes mostrados en el apartado 2.5. En cada iteración 2 individuos eran seleccionados teniendo en cuenta que la probabilidad de selección de cada individuo era igual a la mostrada en la ecuación (1):

$$P_{\text{Selección}_i}^{\text{TOP}} = \frac{\left(\frac{\min(\text{fitness})}{\text{fitness}_i} \right)^{\text{ElitismFactor}}}{\sum_j \text{fitness}_j} \quad (1)$$

Los individuos seleccionados son entonces cruzados y mutados con probabilidad 0.9 y 0.1 respectivamente, obteniéndose así una descendencia de los mismos. El operador de cruce elige dos genes de forma aleatoria e intercambia entre el progenitor 1 y el progenitor 2 el contenido de todos los genes comprendidos entre los anteriormente seleccionados (Ej. Tabla 2).

Tabla 2. Operador de Cruce

| Tareas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Padre 1 | 1.123 | 1.673 | 2.234 | 1.942 | 2.440 | 2.294 |
| Padre 2 | 2.432 | 1.721 | 2.325 | 1.987 | 1.006 | 1.396 |
| Hijo 1 | 1.123 | 1.721 | 2.325 | 1.987 | 2.440 | 2.294 |
| Hijo 2 | 2.432 | 1.673 | 2.234 | 1.942 | 1.006 | 1.396 |

El operador mutación selecciona aleatoriamente un gen de sus progenitores y cambia el valor de su primer dígito (Ej Tabla 3).

Tabla 3. Operador de Mutación

| Tareas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Padre | 1.123 | 1.673 | 2.234 | 1.942 | 2.440 | 2.294 |
| Hijo | 1.123 | 1.673 | 1.234 | 1.942 | 2.440 | 2.294 |

Dicha descendencia es evaluada e introducida en la población. Como la población no permite repetición, cuando un nuevo individuo existe ya en la población, este es eliminado y se introduce uno nuevo de forma aleatoria.

De la población resultante se eligen dos de sus peores miembros para ser eliminados, atendiendo a la probabilidad descrita en la ecuación 2.

$$P_{\text{Selección}_i}^{\text{BOTTOM}} = \frac{\left(\frac{\text{fitness}_i}{\min(\text{fitness})} \right)^{\text{ElitismFactor}}}{\sum_j \text{fitness}_j} \quad (2)$$

El ElitismFactor comienza estando en 1, y cada 10 iteraciones es incrementado en 1, hasta un valor máximo de 20. Esto hace que la búsqueda se diversifique en el espacio de soluciones en un principio y se haga más intensa al final.

4. Tests y Resultados

Para probar la metodología se realizó una batería de problemas generadas aleatoriamente con problemas de diferentes tamaños. Las entradas para el generador de problemas eran el número de vehículos de la flota, el número de tareas flexibles y el número de tareas bien definidas. El generador aleatoriamente distribuía a los consumidores, a la terminal intermodal y al depósito de la empresa que realizaba las tareas de acarreo en un área de 100x100. Las tareas bien definidas consistían en igual probabilidad con recogida de contenedores de la terminal o entregas de contenedores en la misma, y las tareas flexibles significaban la recogida o entrega de contenedores vacíos a los clientes. Las tareas bien definidas tienen unas ventanas temporales entre 30min y 4 h. De las tareas flexibles se fijaba su hora límite para la entrega u hora más temprana para la recogida del contenedor vacío. Ambas ventanas fueron generadas aleatoriamente con distribución uniforme. La velocidad fue considerada una distribución uniforme entre 30 y 70 km/h, siendo por tanto el tiempo de tránsito entre nodos dependiente de la distancia del desplazamiento. Para poder simular la localización en tiempo real de los vehículos, cada vez que estos se desplazan se les asignaba una velocidad atendiendo a la distribución anterior.

Tabla 4. Bateria de problemas

| Ref. | N. Tarea | N. Tareas Bien definidas | Nº Tareas flexibles | Flota |
|------|----------|--------------------------|---------------------|-------|
| L1 | 20 | 0 | 20 | 5 |
| L2 | 20 | 5 | 15 | 5 |
| L3 | 20 | 10 | 10 | 5 |
| L4 | 20 | 15 | 5 | 5 |
| L5 | 20 | 20 | 0 | 5 |
| M1 | 30 | 0 | 30 | 7 |
| M2 | 30 | 10 | 20 | 7 |
| M3 | 30 | 15 | 15 | 7 |
| M4 | 30 | 20 | 10 | 7 |
| M5 | 30 | 30 | 0 | 7 |
| H1 | 40 | 0 | 40 | 9 |
| H2 | 40 | 10 | 30 | 9 |
| H3 | 40 | 20 | 20 | 9 |
| H4 | 40 | 30 | 10 | 9 |
| H5 | 40 | 40 | 0 | 9 |

Para cada uno de los problemas aleatorios generados, se determinó la mejora del algoritmo genético sobre un algoritmo de inserción (Bodin et al, 2000) en la primera optimización de la solución (Tabla 5, columna 2). La columna 3 contabiliza el número de veces que una reoptimización fue lanzada. En la columna 4 se muestra la media de la mejora que produce en algoritmo genético en cada reoptimización con respecto a la mejor situación anterior. En la columna 5 se observa la mejora completa de todo el proceso de dinamismo.

Tabla 5. Resultados

| Ref | Mejora del Genético vs. Algoritmo Inserción (%) | N. Iteraciones | Mejora media del GA (%) | Mejora total (%) |
|-----|---|----------------|-------------------------|------------------|
| L1 | 5,9109 | 6 | 0,23981 | 27,229 |
| L2 | 20,015 | 10 | 0,98411 | 39,084 |
| L3 | 0 | 8 | 2,6657 | 11,052 |
| L4 | 0,3848 | 10 | 0,73763 | 29,83 |
| L5 | 5,0968 | 12 | 2,864 | 34,36 |
| M1 | 27,01 | 8 | 0,5923 | 49,326 |
| M2 | 7,7103 | 10 | 2,3859 | 30,608 |
| M3 | 15,857 | 13 | 5,0287 | 36,844 |
| M4 | 5,507 | 12 | 2,6161 | 23,785 |
| M5 | 6,3091 | 15 | 6,6728 | 25,95 |
| H1 | 6,3557 | 12 | 0,76608 | 35,271 |
| H2 | 1,1787 | 10 | 3,5312 | 10,38 |
| H3 | 16,126 | 12 | 2,9754 | 42,62 |
| H4 | 2,6864 | 13 | 2,3971 | 6,8958 |
| H5 | 10,128 | 18 | 2,4007 | 43,871 |

5. Conclusiones

Queda demostrada en este trabajo la importancia que tiene el conocimiento en tiempo real de la posición de los vehículos de una flota para la optimización en la asignación de las tareas. Este conocimiento exacto de la posición junto a un algoritmo que sea capaz de buscar una buena solución en un tiempo relativamente corto pueden llevar a un ahorro de los costes entorno al 30%. Estos resultados son especialmente valiosos en áreas metropolitanas, donde pueden existir graves problemas de congestión.

La reoptimización de las soluciones solamente fueron consideradas cuando algún vehículo terminaba sus tareas, por lo que una regla de reoptimización más metódica podría incluso aumentar esta mejora. Para solucionar el problema del drayage, un algoritmo genético que considera tiempos de viaje estocásticos fue desarrollado. Este algoritmo mejora la solución del algoritmo de inserción en un 5.57% de media. Sin embargo, la búsqueda dinámica no está ligada con ningún algoritmo de optimización, pudiendo ser el mismo sustituido por cualquier heurística o metaheurísticas, como por ejemplo la búsqueda tabú en la cual se está trabajando.

Referencias

- Bent, R. W. & Van Hentenryck, P. (2004). Scenario-Based Planning for Partially Dynamic Vehicle Routing with Stochastic Customers. *Operations Research*, vol. 52, no. 6, p. 977.
- Bertsimas, D. J. (1992). A vehicle routing problem with stochastic demand. *Operations Research*, vol. 40, no. 3, pp. 574-585.
- Bodin, L., Mingozzi, A., Baldacci, R., & Ball, M. (2000). The Rollon–Rolloff Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, vol. 34, no. 3, pp. 271-288.
- Cheung, R. K. & Hang, D. D. (2003). A time-window sliding procedure for driver-task assignment with random service times. *IIE Transactions*, vol. 35, no. 5, pp. 433-444.
- Cheung, R. K., Hang, D. D., & Shi, N. (2005). A labeling method for dynamic driver-task assignment with uncertain task durations. *Operations Research Letters*, vol. 33, no. 4, pp. 411-420.
- De Meulemeester, L., Laporte, G., Louveaux, F. V., & Semet, F. (1997). Optimal sequencing of skip collections and deliveries. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no. 1, pp. 57-64.
- Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G. (1994). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Management Science*, vol. 40, p. 1276.
- Goldberg, DE y Holland, JH (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine Learning*, vol 3 (2), p. 95-99.
- Laporte, G., Louveaux, F., & Mercure, H. (1992). The vehicle routing problem with stochastic travel times. *Transportation Science*, vol. 26, no. 3, pp. 161-170.
- Morlok, E. & Spasovic, L. (1994). Redesigning rail-truck intermodal drayage operations for enhanced service and cost performance. *Journal of the Transportation Research Forum*, vol. 34, no. 1, pp. 16-31.
- Psaraftis, H. N. (1995). Dynamic vehicle routing: Status and prospects. *Annals of Operations Research*, vol. 61, no. 1, pp. 143-164.
- Smilowitz, K. (2006). Multi-resource routing with flexible tasks: an application in drayage operations. *IIE Transactions*, vol. 38, no. 7, pp. 577-590.
- Wang, J. q., Tong, X. n., & Li, Z. m. (2007). An Improved Evolutionary Algorithm for Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows. In *Computational Science – ICCS 2007*. Springer Berlin / Heidelberg, ed., pp. 1147-1154.