

Book of Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management - XVII Congreso de Ingeniería de Organización.

---

## La Mejora Dinámica del Rutado de Vehículos: Eventos de Reoptimización

The Dynamic Improvement of Vehicle Routing: Reoptimization Events

Escudero A<sup>1</sup>, Muñozuri J, Cortés P, Aparicio P

**Abstract** The static environments of optimization are not efficient when there is Uncertainty. The vehicle routing is a common case of it. For example, there usually is uncertainty in the transit time due to the congestion, traffic jam, etc. Dynamic optimization has been more efficient in these environments. To determinate when a reoptimization have to be run is fundamental.

**Resumen** Los entornos estáticos de optimización no son todo lo eficientes que se esperaría en situaciones donde existe incertidumbre. El rutado de vehículos es un caso común donde existe incertidumbre, por ejemplo en el tiempo de tránsito, motivado principalmente por los diferentes niveles de congestión existentes. La reoptimización dinámica se ha mostrado más eficaz en este tipo de sistemas. Determinar en que momentos realizar la reoptimización es fundamental en la eficiencia de este tipo de sistemas.

**Keywords:** Uncertainty, VRP, Drayage, Dynamism

**Palabras clave:** Incertidumbre, VRP, Acarreo, Dinamismo

### 1 Introducción

En trabajos previos (Escudero et al. 2011a, Escudero et al. 2011b, Escudero et al. 2013) se demostró que las metodologías tradicionales de optimización de rutas de

---

<sup>1</sup>Alejandro Escudero Santana (✉ e-mail: alejandroescudero@etsi.us.es)  
Grupo Ingeniería de Organización. Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II.  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos  
S/N, 41092 Sevilla.

vehículos no son todo lo eficientes que se desearía cuando se desarrollan en entornos reales, donde diferentes elementos de incertidumbre aparecen.

La forma clásica de optimizar estos procesos se ha desarrollado desde una perspectiva estática; al principio de la jornada, el decisor presenta las rutas que los diferentes vehículos deberán desarrollar durante la jornada. Si se presenta algún tipo de incidente en el tráfico de los vehículos puede que las rutas planteadas al principio de la jornada no puedan llevarse a cabo según las restricciones temporales comprometidas.

Múltiples estudios ponen de manifiesto el valor de la información a la hora de elegir rutas por los usuarios (Levinson, 2003; Chorus et al., 2006). Sin embargo esa obviedad no había sido llevada a la forma de optimización de las rutas. Ad-del-Aty et al. (1997) señalan que esta información puede ahorrar tiempo, estudiar la forma y el momento en el que esta información es suministrada es importante para que esta sea realmente útil (Koutsopoulos y Xu, 1993).

Este trabajo propone la optimización de la jornada, del problema del acarreo terrestre (Escudero et al. 2012), desde una perspectiva dinámica, de manera que la solución va evolucionando a lo largo del día, adaptándose a las circunstancias que vayan aconteciendo. Este proceso se realiza ayudado por el conocimiento en tiempo real de la posición de los vehículos.

Numerosos estudios sobre problemas de rutado dinámico pueden encontrarse en la literatura (Psaraftis, 1995; Pillac et al., 2013), aunque estos suelen estar centrados en la incertidumbre que presentan que un determinado cliente requiera el servicio, y no en la incertidumbre en el tiempo de tránsito.

El siguiente epígrafe, sección 2, comienza presentando la estructura del sistema planteado. Seguidamente, sección 3, se enumeran posibles eventos que pueden llevar al lanzamiento de una reoptimización. Por último, sección 4, se mostrarán algunos resultados alcanzados y se enunciarán una serie de conclusiones, sección 5.

## 2 El Sistema Dinámico

La arquitectura del sistema dinámico diseñado se muestra de modo esquemático en la Figura 1. Este sistema recibiría diversos tipos de informaciones, que serían posteriormente utilizadas como datos para la ejecución del algoritmo dinámico de asignación (Escudero et al. 2011a, Escudero et al. 2011b, Escudero et al. 2013):

- Solicitudes de tareas, que podrían ser directamente incorporadas al sistema por parte de los clientes del mismo.
- Información sobre la posición de los vehículos en el viario. Esta posición puede ser determinada según diferentes tecnologías existentes. En la Figura 1 se ejemplifica a través de dos posibles sistemas: GPS o Galileo.

- Información sobre la compleción de tareas, proporcionada por los conductores de los vehículos al sistema a través del correspondiente interfaz de comunicaciones.
- Por último, y de manera opcional, el sistema podría contar con información actualizada sobre el estado del viario (fundamentalmente el grado de congestión y la velocidad media en los diferentes tramos del mismo), en caso de que esta información estuviera disponible. De esta manera, el sistema, además de reorganizar las rutas asociadas a las tareas basándose en estimaciones de las velocidades medias en el viario, podría recalcular las rutas atendiendo a valores mucho más cercanos a la realidad.

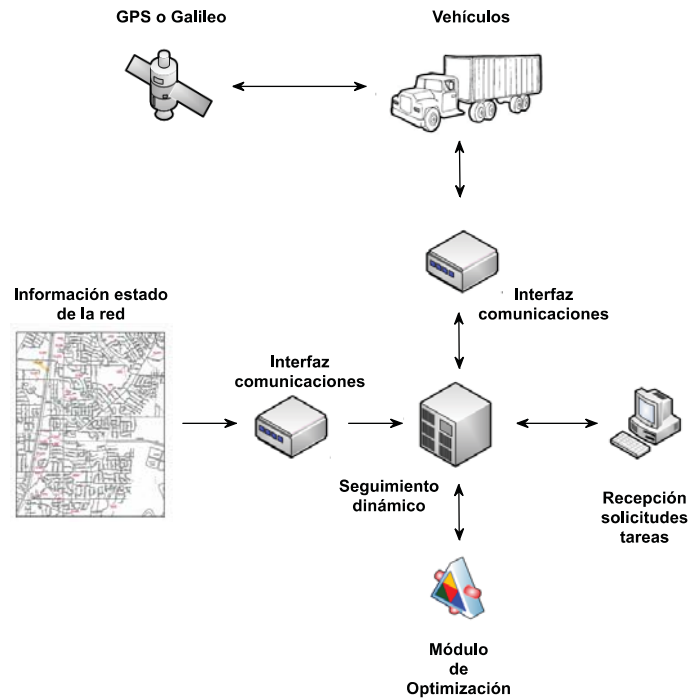


Fig. 1 Sistema global de optimización dinámica

La metodología dinámica que se plantea va mejorando la solución iterativamente. Al principio de la jornada, se lanza una optimización inicial al problema, que permitiría poseer una solución de partida. Sin embargo, dado que el tiempo de tránsito es incierto, se hace imposible conocer a priori el tiempo exacto requerido para completar una tarea; y por lo tanto, aparecen desajustes entre la realidad y lo esperado según la solución planteada al principio.

Para corregir dichos desajustes se ha planteado una metodología dinámica de optimización. En ciertos momentos se lanzan reoptimizaciones en búsqueda de una solución que se adapte mejor a las circunstancias reales existentes, y que pueden corregir los previsible retrasos, o incluso adelantos, en la ejecución de las tareas. Esta reoptimización habrá tenido en cuenta las circunstancias reales que acontecen y sólo considerará las tareas pendientes de ejecutar. La nueva solución podrá cambiar la asignación de tareas a vehículos, teniendo en cuenta que los vehículos que se encuentran ejecutando tareas en ese momento deberán terminarl as antes de poder empezar con una nueva.

Un esquema de todo este proceso es representado en la Figura 2, donde se aprecia que el sistema siempre está informado de la posición en la que se encuentran los vehículos.

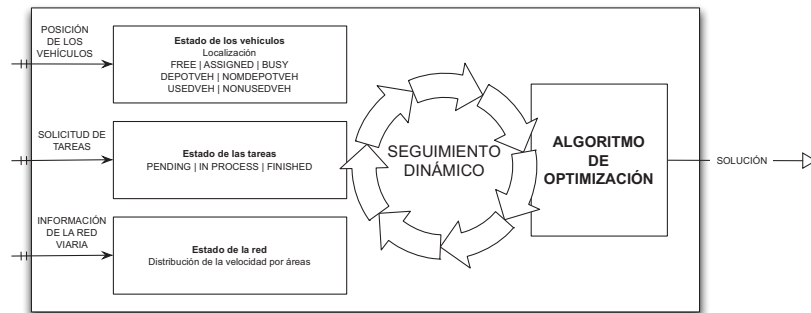


Fig. 2 Esquema de seguimiento dinámico

### 3 Eventos de Reoptimización

Las reoptimizaciones comentadas se lanzan cuando ocurren algunas circunstancias destacables, llamadas eventos de reoptimización. Cuatro eventos distintos han sido propuestos:

- Un tiempo fijo.
- Al terminar una tarea.
- Cuando un vehículo se desvía de su posición deseable un determinado factor.
- En un instante crítico.

El procedimiento iterativo de mejora no tiene por qué tener en cuenta todos los eventos de reoptimización señalados; será necesario establecer una solución de compromiso entre capacidad de adaptación y el número de reoptimizaciones.

Los dos primeros eventos son sencillos de comprender. En el primero la reoptimización se lanza cada cierto tiempo, cuando ha transcurrido un tiempo desde la

anterior reoptimización. Este tiempo es fijado a priori, por ejemplo 15 minutos. En el segundo tipo de evento la reoptimización se lanza al concluir la ejecución de una tarea; de ese modo, antes que el conductor que acaba de terminar la tarea se dirija a la siguiente tarea, se examina si las condiciones del entorno han cambiado, y por tanto pueden existir mejores alternativas.

El tercer evento de reoptimización lanza la misma cuando los vehículos se retrasan de las posiciones esperadas, intentando buscar soluciones que no tengan dificultades en alcanzar determinadas tareas. Una explicación del lanzamiento puede verse en la Figura 3. La Figura 3a muestra la asignación inmediata de un determinado vehículo, las tareas 1 y 2 en el ejemplo; y la Figura 3b muestra el esquema espacio-temporal para el cumplimiento de las ventanas temporales de las dos tareas que el vehículo tiene asignadas a priori. Si un vehículo se encuentra dentro de las franjas marcadas por líneas discontinuas para una determinada ventana temporal, entonces se encuentra dentro de una posición esperada para completar la tarea a tiempo; si el mismo se encuentra por encima de la línea discontinua superior y por debajo de la línea continua entonces el vehículo se encuentra retrasado respecto a su situación esperada, pero su desviación respecto a la posición esperada está dentro de un factor de tolerancia; si el vehículo se encuentra por encima de dicha línea continua, se hace necesaria una reoptimización, en búsqueda de soluciones más fiables. Las tareas que se analizarán de las asignadas al vehículo serán las que se encuentran dentro de una distancia de análisis. Siguiendo con el ejemplo de la Figura 3b un vehículo en la situación de **a** se encuentra dentro de su posición esperada para cumplir a tiempo la tarea 1 y la tarea 2; si el mismo se encontrara en la situación de **b** podría cumplir las restricciones temporales de la tarea 1, sin embargo es previsible que tenga dificultades para cumplir las restricciones temporales de la tarea 2, por lo que atendiendo a la distancia de análisis se lanzaría una reoptimización; en la situación **c** el vehículo se encuentra en una situación esperada para desarrollar la tarea 2; un vehículo en **d** se habría desviado y estaría algo retrasado, pero se encontraría dentro la ventana de tolerancia; por último, un vehículo en la situación **e** estaría retrasado para poder completar a tiempo la tarea 2, y se produciría una reoptimización, con la espera de poder encontrar una solución mejor del problema.

El último de los eventos indicados lanza una reoptimización cuando se alcanza el *instante crítico* de una determinada tarea. Este instante se define como el momento en el que un vehículo necesitaría salir del depósito para poder realizar a tiempo la tarea correspondiente. Este tipo de evento de reoptimización será siempre un complemento de los anteriores, y nunca el algoritmo dinámico funcionará con él sólo.

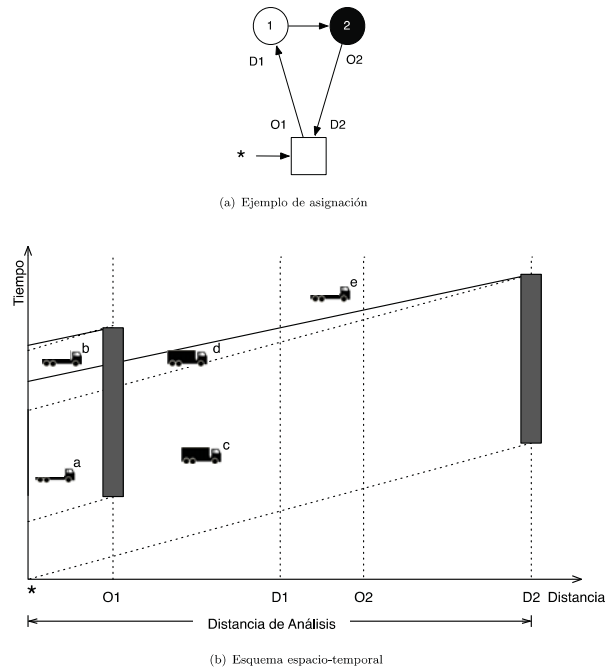


Fig. 3 Reoptimización por desviación de la posición esperada.

## 4 Test y Resultados

Este epígrafe va a intentar comparar los eventos de reoptimización mostrados anteriormente. La reoptimización al terminar la tarea y la reoptimización en un instante crítico se realizarán siempre. Testeándose las otras dos reoptimizaciones como complemento de las anteriores. Este planteamiento se sustenta en el hecho de que la reoptimización no puede perder la oportunidad de cambiar la asignación de tareas sin necesidad de que el vehículo se vea afectado en mitad de la ruta; por tanto no se ha considerado oportuno dejar de usar la reoptimización en el momento que una tarea es finalizada.

En el caso de reoptimizaciones cada cierto intervalo de tiempo, una importante cuestión sería determinar dicho intervalo temporal. Se diseñó para tal fin un experimento que, sobre un mismo problema (instancia R1.1 para 25 tareas), iba variando dicho intervalo de reoptimización, ReOptTime. De este modo se pretendía ver cómo se comportaba la solución (ver Figura 4a) y cuánto tiempo de ejecución en la CPU consumía (ver Figura 4b).

Los resultados muestran cómo por norma al disminuir el intervalo de reoptimización aumenta la calidad de la solución (ver Figura 4a), aunque aumenta el tiempo

po de computación consumido (ver Figura 4b). A la vista de los resultados, un intervalo de reoptimización de unos 10 minutos se ha considerado el más apropiado, dado que aumenta la calidad de la solución sin aumentar excesivamente el tiempo de computación.

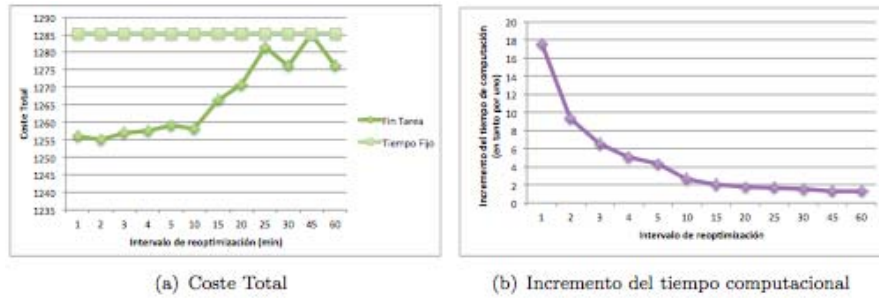


Fig. 4 (a) Coste total de la solución y (b) tiempo computacional consumido dependiendo del intervalo de reoptimización.

La Tabla 1 muestran una comparativa de los diferentes eventos de reoptimización testeado para diferentes tamaños de problemas. En la misma se muestra el porcentaje de mejora respecto al caso de no aplicar reoptimización. FinT significa que existe reoptimización al finalizar una tarea, FixT significa que se han añadido reoptimizaciones cuando pasa un cierto tiempo fijo, y por último DEP significa que se han añadido reoptimizaciones cuando existe desviación de los vehículos sobre la posición esperada.

Las tablas muestra varios detalles a destacar. El primero que, por norma general, añadir nuevos eventos de reoptimizaciones mejora la calidad de las soluciones; de media la opción de reoptimizar cada cierto tiempo y cuando termina una tarea es la que mejores prestaciones presenta.

Cuando se habla de casos particulares el comportamiento no es siempre así; reoptimizar más veces no tiene necesariamente que implicar mayor mejora. Este hecho es lógico; dado que las reoptimizaciones cambian asignaciones de tareas a vehículos ante circunstancias adversas, los vehículos cambian sus rutas; sin embargo estos cambios no garantizan que el tráfico vaya a ser fluido en la nueva ruta.

Otra consideración a tener en cuenta es el tiempo de computación que ocupa cada una de las alternativas mostradas; los tiempos para todos los tipos de reoptimizaciones por número de tareas se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 1** Comparación de diferentes eventos de reoptimización – Mejora

Número Tareas	Clase	Mejora (%)		
		FinT	FixT	DEP
25	R1	5,88	6,41	6,19
	C1	1,76	1,92	1,83
	RC1	4,38	4,97	4,97
	Total	4,18	4,62	4,50
50	R1	4,96	5,25	5,07
	C1	3,96	3,74	3,97
	RC1	4,30	4,66	4,46
	Total	4,47	4,62	4,56
100	R1	8,05	8,61	8,37
	C1	7,66	7,34	7,44
	RC1	5,66	5,75	5,76
	Total	7,27	7,43	7,36

**Tabla 2** Comparación diferentes eventos de reoptimización – Tiempo computacional (seg.)

Evento	Número de tareas		
	25	50	100
FinT	0,63	2,05	12,97
DEP	1,27	3,82	21,24
FixT	2,12	6,92	35,15

## 5 Conclusión

La reoptimización como búsqueda dinámica de mejores soluciones se ha presentado como un proceso eficaz para la mejora de procedimientos donde existe incertidumbre. Sin embargo, es necesario ser cuidadoso en que momentos se realizan dichas reoptimizaciones, para de este modo conseguir además un proceso eficiente.

Un aumento del número de reoptimizaciones trae consecuentemente ligado una mejora media en las soluciones encontradas, pero esta mejoría no se comporta de modo proporcional al aumento del tiempo computacional.

Este trabajo a testado diferentes eventos de reoptimización, para demostrar que no sólo es necesario realizar este proceso iterativo de mejora, sino que además es conveniente elegir adecuadamente el momento en el cual realizarlo.



## 6 Referencias

- Adbdel-Aty MA, Kitamura R y Jovanis PP (1997). Using stated preference data for studying the effect of advanced traffic information on drivers' route choice. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, 5(1), pp. 39–50.
- Chorus CG, Arentze TA, Molin EJE, Timmermans HJP y van Wee B (2006). The value of travel information: Decision strategy-specific conceptualizations and numerical examples. *Transportation Research Part B - Methodological*, 40(6), pp. 504–519.
- Escudero A, Muñuzuri J, Arango C y Onieva L (2011). A satellite navigation system to improve the management of intermodal drayage. *Advanced Engineering Informatics*, 25(3), pp. 427–434.
- Escudero A, Muñuzuri J, Guadix J y Arango C (2011) Heurística de asignación en tiempo real de vehículos a tareas de acarreo intermodal. *Dirección y Organización, Revista de Ingeniería de Organización*, 45, 32-37.
- Escudero A, Muñuzuri J, Guadix J y Arango C (2013). Dynamic approach to solve the daily drayage problem with transit time uncertainty. *Computers in Industry*. doi: 10.1016/j.compind.2012.11.006.
- Escudero A, Muñuzuri J, Onieva L, Arango C (2012) Oportunidades del daily drayage problem en la optimización del transporte de mercancías europeo. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2012), Vigo.
- Koutsopoulos HN y Xu H (1993). An information discounting routing strategy for advanced traveler information systems. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, 1(3), pp. 249–264.
- Levinson D (2003). The value of advanced traveler information systems for route choice. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, 11(1), pp. 75–87.
- Pillac V, Gendreau M, Guéret C y Medaglia AL (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), pp. 1–11.
- Psaraftis HN (1995). Dynamic vehicle routing: Status and prospects. *Annals of Operations Research*, 61(1), pp. 143–164.