

Criterio Económico para la Optimización de Rutas con Flotas Heterogéneas VRPHESTW

Víctor Yepes Piqueras

Director del Área de Producto, *Agència Valenciana del Turisme,*
Generalitat Valenciana, España

Josep R. Medina Folgado

Catedrático, Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes,
Universidad Politécnica de Valencia, España

RESUMEN

Se presenta una metaheurística trifase basada en GRASP, búsqueda local aleatoria con múltiples operadores, aceptación por umbrales y reconstrucción de soluciones para la resolución del problema de las rutas con flotas heterogéneas y ventanas temporales flexibles con jornada laboral de coste variable y con la inclusión de la congestión por tráfico. Se define un modelo de penalización económica para los horarios de servicio que recoge la insatisfacción del cliente. Se emplea una función objetivo basada en el beneficio económico como lenguaje común en la medición de tarifas, costes y ruptura de restricciones. Por último se analiza la variación de las tarifas y de los costes en la calidad de los resultados.

1. INTRODUCCIÓN

Pocos han sido los trabajos que han tratado el problema de las rutas flexibilizando el horario de servicio a los clientes “*Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows*” en comparación con el clásico VRPTW (Koskosidis, Powell y Solomon, 1992; Taillard *et al.*, 1997). Sin embargo, existen buenos argumentos para resolver el VRPSTW:

- Es un problema más genérico que el VRPTW. Así, con una penalización fuerte en la trasgresión de las ventanas temporales, resulta sencillo rigidizar los horarios de entrega.
- Se acerca más a las situaciones reales, donde se busca un compromiso entre el tamaño de las flotas y la calidad del servicio. Es posible valorar como penalización la insatisfacción del cliente cuando el servicio se inicia fuera del horario previsto.
- Se amplía el campo de las soluciones factibles, pues en ocasiones pequeñas violaciones de las restricciones permiten buenas soluciones en la práctica.
- Cuando la función objetivo tiene un verdadero sentido económico, las penalizaciones se integran sin problemas en las métricas que valoran la calidad alcanzada por las soluciones.

Además, la flota de vehículos de una empresa de transporte no suele ser homogénea. Éstos difieren

en equipamiento, en capacidad, en antigüedad y en estructura de costes. La necesidad de estar presente en los diversos segmentos de mercado, obliga a muchas empresas a disponer de vehículos que se adapten a diversas tipologías como el transporte de graneles, contenedores, etc. Asimismo, la disposición de unidades con diferentes capacidades de carga permite una mejor adaptación a la demanda. El problema de las rutas con una flota heterogénea y limitada de unidades de cada clase y donde los costes de operación y los fijos dependen del tipo de vehículo “*Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet of Vehicles*” (VRPHE) ha recibido muy poca atención (ver Taillard, 1999) en relación con el clásico VRP. Son menos las aportaciones realizadas cuando se consideran las restricciones temporales en el servicio. Así, Liu y Shen (1999) describen un método de construcción en paralelo de soluciones donde el número de vehículos de cada tipo es ilimitado y Dullaert *et al.* (2001) desarrollan heurísticas de construcción secuenciales para el mismo problema.

La ponencia aborda el problema de las rutas con flotas heterogéneas de vehículos con restricciones temporales blandas de servicio “*Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet of Vehicles with Soft Time Windows*” (VRPHESTW). Se trata de diseñar un conjunto de rutas para una flota de vehículos heterogénea que empiecen y terminen en un almacén de modo que se visiten todos los destinos una sola vez minimizando una función objetivo y satisfaciendo a su vez las restricciones horarias de inicio del servicio en cada cliente. Estas restricciones se definen mediante ventanas temporales que fuerzan una espera si se llega antes de su límite inferior y que impiden el servicio si se supera el límite superior. Además, las condiciones reales que determinan la gestión de las empresas de distribución de bienes y mercancías suponen decisiones que fluctúan en función de múltiples variables económicas (costes de los combustibles, de las tripulaciones, de la flota, etc.). Asimismo, la compañía debe conocer sus márgenes de explotación, su política de precios y sus clientes preferentes. En la ponencia se describe una función objetivo basada en la rentabilidad económica usada para optimizar los problemas de rutas. Esta circunstancia (Yepes y Medina, 2000), proporciona ventajas evidentes en la gestión, a diferencia de los criterios de valoración de soluciones tradicionales (preferencia por menor número de vehículos y luego distancia total recorrida). Se presenta una metaheurística trifase basada en GRASP (ver Kontoravdis y Bard, 1995), búsqueda local aleatoria con múltiples operadores, aceptación por umbrales (ver Dueck y Scheuer, 1990) y reconstrucción de soluciones (ver Schrimpf *et al.*, 2000) para la resolución del VRPHESTW. Se analizan cómo posibles variaciones en los costes o en las tarifas modifican la topología del espacio de soluciones y permiten tomar decisiones que se adaptan a la realidad de los problemas de distribución.

2. LAS VENTANAS TEMPORALES

Suele ser habitual en los problemas de distribución que el servicio prestado a un cliente esté sujeto a ciertas restricciones. Cada cliente tiene preferencias o limitaciones que obligan a que el servicio ocurra a unas horas determinadas. Se denomina *ventana temporal* de un cliente al intervalo de tiempo dentro del cual es posible iniciar el servicio de carga o descarga de las mercancías

transportadas por un vehículo. El almacén también presenta un horario de apertura, de modo que todos los vehículos deberán partir del depósito y llegar a él dentro de este intervalo. Se define el problema de las ventanas temporales flexibles cuando se está dispuesto, dentro de ciertos límites, a aceptar el inicio del servicio fuera del horario estricto siempre que se apliquen penalizaciones económicas. De este modo, la ventana temporal flexible de un cliente j queda definida por cuatro instantes. Un vehículo que desde el nodo i se dirija al j debe realizar una espera w_{ij} si se presenta en el nodo j con anterioridad al límite inferior aceptable e_j^s . Si la hora de llegada ocurre dentro del horario de descarga estricto, definido por sus límites e_j^h y u_j^h , entonces se acepta el servicio sin penalizaciones. La llegada posterior a la hora límite aceptable u_j^s impide la realización del servicio. En la Figura 1 se representan las penalizaciones económicas, en función del instante de llegada del vehículo al nodo j . En ordenadas se representa la variable de costes y en abcisas el tiempo.

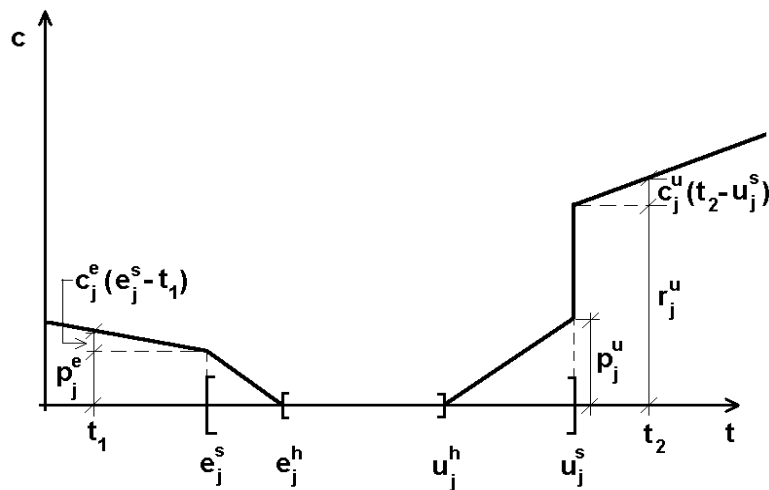


Fig. 1 – Modelo de penalización económica para un cliente j con ventana temporal flexible en la aceptación del servicio.

3. LA FUNCIÓN OBJETIVO

Se han empleado numerosas métricas como función objetivo en la resolución de las redes de distribución. Tradicionalmente se ha considerado que las soluciones con un menor número de rutas son preferibles en primer lugar por cuanto los costes fijos asociados a un nuevo vehículo se suponen suficientemente elevados. Como segunda opción el discriminante empleado ha sido la distancia total recorrida, y en otros casos, el tiempo total empleado. No han faltado las ponderaciones paramétricas de las opciones anteriores. Los resultados obtenidos dependían, evidentemente, de la elección adoptada. Los problemas reales precisan criterios que sean traducibles a algún tipo de lenguaje común en las empresas. Este idioma es el económico. Una ponderación adecuada es aquella que transforma en términos monetarios las métricas empleadas en la resolución de las redes de distribución. De este modo, una primera aproximación es aquella que resuelve los problemas del

transporte en términos de un menor coste para la empresa. En esta función de coste se deberían evaluar las rupturas en las restricciones del modelo, incluso las insatisfacciones de los clientes. Una coyuntura que impidiese satisfacer la demanda de un destino podría suponer un coste de oportunidad para la empresa en el caso de perderlo. Si la cuantía es elevada, el proceso de optimización tenderá a evitar fuertemente estas tesituras. Por el contrario, en ocasiones el cliente aceptaría incluso un servicio deficiente si se le compensase de alguna forma por ello. Sin embargo, las empresas fundamentan sus estrategias tanto en los ingresos como en los gastos. Se tratará, por tanto, de maximizar el beneficio obtenido por el conjunto de las operaciones. Una primera aproximación a los problemas de distribución con funciones objetivo basadas en el beneficio fue propuesta por Yepes y Medina (2000).

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se analiza un problema ampliado del R103 de Solomon (1987) con coeficientes que definen la función objetivo y las características de la flota, de clientes y depósito reflejados en la Tabla 1, denominado como R103-HES-A. No existen ejemplos en la literatura para resolver el VRPHESTW con criterios basados en el beneficio, con distintas jornadas laborales y variables de congestión (duración de la aproximación y alejamiento a cada nodo).

Flota	a	b	g	Características	Cliente	Depósito
Número	2	8	∞	Tarifa disposición servicio	1500	-
Capacidad	100	200	500	Tarifa por unidad y distancia	15	
Velocidad	1,10	1,00	0,90	Duración aproximación	1	2
Jornada normal	200	200	200	Duración servicio	10	-
Jornada extraordinaria	50	50	50	Duración alejamiento	1	2
Duración carga	3	5	8	Inicio suave TW e_j^s	$0,90 e_j^h$	230
Coste disposición	10000	10000	12000	Final suave TW u_j^s	$1,05 u_j^h$	250
Coste distancia	100	100	110	Penalización apertura p_j^e	50	-
Coste horario normal	100	100	110	Penalización apertura k_j^e	1	-
Coste horario extra	120	120	130	Penalización horaria espera c_j^e	10	-
Coste horario plus	150	150	160	Penalización cierre p_j^u	50000	1000
Tasa visita cliente	0	0	0	Penalización cierre k_j^u	1	1
Tasa inicio ruta	1000	1000	1500	Coste ruptura cierre r_j^u	10^7	10^8
				Penalización horaria ruptura	1000	10000

				c_j^u		
--	--	--	--	---------	--	--

Tabla 1 – Características de la flota, de los clientes y del depósito, para R103-HES-A.

Para resolverlo, se propone una metaheurística en tres fases sucesivas. La primera construye una solución inicial obtenida con un GRASP dirigido basado en un algoritmo probabilístico de construcción secuencial. Posteriormente se aplica una búsqueda convergente con un descenso aleatorio multioperador de máximo gradiente y, se termina con una búsqueda local aleatoria dentro de un esquema de aceptación por umbrales con operadores múltiples que recogen algunos de reconstrucción de soluciones. Las probabilidades de elección de los operadores empleados en la segunda fase figuran en la Tabla 2, y los de la tercera en la Tabla 3. Se han empleado como operadores específicos para el VRPHESTW el cambio de vehículos entre rutas (CVR) y con otros de la flota no utilizados (CV). Los resultados obtenidos se reflejan, para 5 resoluciones del problema, en la Tabla 4. Los detalles de la mejor solución encontrada se recogen en la Tabla 5.

Operador	Prob.	Operador	Prob.	Operador	Prob.	Operador	Prob.
1-rel	20	2-sw	20	2-rel	20	RR0	1
2-opt*	20	(2-0)	1	(2-1)	5	(2-2)	1
2-opt**	1	CV	5	CVR	5	RedR	1

Tabla 2 – Probabilidades elegidas, en porcentajes, para 12 operadores de la búsqueda convergente de la fase 2 en descenso aleatorio de máximo gradiente.

Operador	Prob	Operador	Prob	Operador	Prob	Operador	Prob	Operador	Prob
1-rel	10	1-sw	10	2-rel	5	2-sw	10	Cross	10
2-opt*	25	(2-0)	1	(2-1)	10	(2-2)	1	RR0	1
2-opt**	5	CV	5	CVR	5	RedR	1	RR15	1

Tabla 3 – Probabilidades elegidas, en porcentajes, para 15 operadores de la búsqueda convergente de la fase 2 en descenso aleatorio de máximo gradiente.

Seguidamente se analiza la incidencia de un incremento del coste por unidad de distancia del 10%. Así, queda definido el problema R103-HES-B con los mismos datos que el R103-HES-A, pero siendo los costes por unidad de distancia recorrida para los vehículos tipo α y β de 110, mientras que para el γ queda fijado en 121. Las tarifas, y por tanto los ingresos, siguen siendo iguales en ambos casos. Para ello se aplica la metaheurística híbrida en tres fases descrita anteriormente, recogiendo los resultados en la Tabla 6.

La pérdida de beneficio ha sido del 4,75% en relación con los mejores resultados, siendo del 7,75% si se comparan los beneficios de los resultados medios. En cuanto a los costes, los incrementos han sido del 1,35% y del 1,98%, respectivamente. En este caso, el mayor coeficiente de variación de los

resultados obtenidos para el R103-HES-B ha dado como resultado un máximo que disminuye las pérdidas respecto a los valores medios. También se comprueba cómo una penalización de los costes por distancia provoca que éstas se reduzcan sensiblemente: 2,55% y 0,77% en las soluciones de beneficio máximo y medio.

R103-HES-A	mínimo	media	máximo	C.V. %
Fase 1	14	13,40	13	4,087
	1493,69	1499,54	1502,15	1,069
	74862,19	85652,98	93619,56	9,682
Fase 2	14	13,40	13	4,087
	1439,16	1462,97	1477,48	2,535
	97356,63	103367,13	106097,19	3,488
Fase 3	14	13,40	13	4,087
	1297,79	1309,22	1280,43	1,576
	133709,56	143170,13	155954,50	6,159

Tabla 4 – Resultados al problema R103-HES-A tras aplicar una metaheurística trifase en cinco ensayos. Coeficiente de variación en %.

Ingreso	Coste	Distancia	Hora llegada	Espera total	Horas ordinarias	Horas extra	Penalizaciones
703657,31	547702,81	1280,43	232,73	50,54	2436,68	143,82	1573,64

Tabla 5 – Resultados obtenidos para el problema R103-HES-A.

R103-HES-B	mínimo	media	máximo	C.V. %
Fase 1	14	13,40	14	4,087
	1482,17	1513,69	1483,57	2,222
	57598,56	66388,69	77233,75	11,775
Fase 2	14	13,60	14	4,027
	1452,27	1471,87	1442,59	2,312
	82363,69	86423,88	90159,00	3,330
Fase 3	14	13,40	13	4,087
	1310,6	1299,15	1247,84	3,021
	121742,56	132070,13	148542,02	8,947

Tabla 6 – Resultados al problema R103-HES-B tras aplicar una metaheurística trifase en cinco ensayos. Coeficiente de variación en %.

A continuación se analiza la influencia en los beneficios si se incrementa en un 10% la tarifa aplicada tanto a las mercancías por unidad y distancia hasta el depósito, como en la tarifa fija establecida por

servicio al cliente. Así, el problema R103-HES-C presenta los mismos datos de entrada que el R103-HES-A, excepto en las tarifas que pasan a ser de 1650 por disposición del servicio y de 16,50 por unidad y distancia del cliente al depósito. Los ingresos se incrementan de esta forma un 10%. Los resultados se recogen en la Tabla 7.

Los resultados obtenidos muestran que, respecto al problema R103-HES-A, el número de vehículos necesarios se ha incrementado ligeramente: en el mejor resultado se pasa de 13 a 14. El beneficio ha aumentado en un 40,51% y un 43,17% en los casos mejores y medios. Sin embargo las cifras deberían ser del 49,63% y del 54,06%, respectivamente si, una vez resuelto el problema A, se aplica el incremento de las tarifas. En relación con las distancias recorridas, tanto en los resultados mejores como en los medios, éstas son menores en el problema C que en el A. Las reducciones han sido, respectivamente, del 2,43% y del 0,59%. Sólo se resalta la reducción en la variación de los datos del problema C.

R103-HES-C	mínimo	media	máximo	C.V. %
Fase 1	14	14,00	14	0,000
	1580,34	1597,39	1550,70	1,965
	122195,44	129511,90	135557,13	4,034
Fase 2	14	14,00	14	0,000
	1552,50	1533,11	1536,68	1,014
	148362,06	152531,85	154465,13	2,130
Fase 3	14	14,00	14	0,000
	1319,50	1301,52	1249,26	2,843
	196411,81	204983,70	219131,56	4,804

Tabla 7 – Resultados al problema R103-HES-C tras aplicar una metaheurística trifase en cinco ensayos. Coeficiente de variación en %.

Se puede interpretar este tipo de resultados, en principio paradójicos, en el sentido que la construcción de buenas soluciones iniciales influye en la calidad posterior de los resultados obtenidos al aplicar una metaheurística determinada. Así, el incremento de tarifas ha mermado la influencia del coste de la incorporación de un nuevo vehículo, y la construcción de la solución inicial ha infravalorado este hecho. Por tanto, es posible encontrar buenas soluciones a un problema de optimización definido por su función objetivo y sus restricciones, aplicando metaheurísticas a problemas paralelos con funciones objetivo distintas a las reales.

5. CONCLUSIONES

La resolución de problemas reales de distribución implica la adopción de modelos de mayor

complejidad a los empleados habitualmente, para lo cual son necesarias metaheurísticas que proporcionen buenas soluciones en tiempo de cálculo razonable. La adopción de una función objetivo basada en el beneficio económico permite la adopción de un lenguaje común capaz de ponderar adecuadamente los costes, beneficios y penalizaciones por rupturas en las restricciones del modelo. Asimismo, la flexibilización de los horarios de servicio a los clientes permite la valoración de la insatisfacción del cliente y el alcanzar soluciones de mayor calidad.

La ponencia ha presentado una metaheurística trifase basada en la construcción de soluciones iniciales mediante un GRASP dirigido, una búsqueda convergente con descenso aleatorio multioperador de máximo gradiente y una búsqueda local aleatoria dentro de un esquema de aceptación por umbrales con operadores múltiples, incluidos algunos de reconstrucción de soluciones. Se ha aplicado al problema de las rutas heterogéneas con ventanas temporales flexibles VRPHESTW, con la inclusión de varias jornadas laborables y la congestión de tráfico. Se ha comprobado la influencia de la variación de las tarifas o los costes, y se ha comprobado que, en ocasiones, la adopción de funciones objetivo modificadas nos acercan, con determinadas metaheurísticas a soluciones de mayor calidad.

REFERENCIAS

- DUECK, G.; SCHEUER, T. (1990). Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. *Journal of Computation Physics* 90, pp. 161-175.
- DULLAERT, W.; JANSSENS, G.K.; SÖRENSEN, K.; VERNIMMEN, B. (2001). New heuristics for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows. *9th World Conference on Transport Research, July 22-27, Seoul*.
- KONTORAVDIS, G.A.; BARD, J.F. (1995). A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *ORSA Journal on Computing* 7(1), pp. 10-23.
- KOSKOSIDIS, Y.A.; POWELL, W.B.; SOLOMON, M.M. (1992). An Optimization-Based Heuristic for Vehicle Routing and Scheduling with Soft Time Window Constraints. *Transportation Science* 26(2), pp.69-85.
- LIU, F.H.; SHEN, S.Y. (1999). A Method for Vehicle Routing Problem with Multiple Vehicle Types and Time Windows. *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)* 23(4), pp. 526-536.
- SCHRIMPF, G.; SCHNEIDER, J.; STAMM-WILBRANDT, H.; DUECK, G. (2000). Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle. *Journal of Computational Physics* 159, pp. 139-171.
- SOLOMON, M.M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research* 35(2), pp. 254-265.
- TAILLARD, É.D. (1999). A Heuristic Column Generation Method for the Heterogeneous Fleet VRP. *RAIRO Rech. Opér.* 33(1), pp.1-14.
- TAILLARD, É.D.; BADEAU, P.; GENDREAU, M.; GUERTIN, F.; POTVIN, J.Y. (1997). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *Transportation*

Science 31 (2), pp. 170-186.

YEPES, V.; MEDINA, J.R. (2000). Optimización del problema generalizado de las rutas con restricciones temporales y de capacidad (CVRPSTW), en COLOMER, J.V. y GARCÍA, A. (Eds.): *Calidad e innovación en los transportes. Actas del IV Congreso de Ingeniería del Transporte*. Vol. 2, pp. 705-710. Valencia.