

OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE REDES DE TRANSPORTE DEL TIPO VRPTW

VRPTW ECONOMICAL OPTIMIZATION OF TRANSPORT NETWORKS

VÍCTOR YEPES PIQUERAS. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Profesor Asociado. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Valencia. vyepesp@cst.upv.es

JOSEP R. MEDINA FOLGADO. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Catedrático de Universidad. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Valencia.

Director del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia. jrmedina@tra.upv.es

RESUMEN: El transporte de personas y mercancías genera unos costes económicos, sociales y medioambientales de gran envergadura. Una adecuada gestión de los problemas de distribución física afecta directamente a la competitividad de las empresas. Así, el establecimiento de rutas y horarios para vehículos que deben distribuir o recoger mercancías a un grupo de clientes constituyen problemas habituales que no se resuelven de manera óptima y acarrear una merma significativa de la rentabilidad de las operaciones. En este contexto, se presentan algunas metaheurísticas de optimización habituales en inteligencia artificial, que emulando procesos de la Naturaleza, proporcionan soluciones satisfactorias a los complicados problemas de distribución. Este artículo presenta el problema de las rutas heterogéneas y múltiples usos con ventanas de tiempo flexibles VRPHEMSTW, con la inclusión de variables económicas fundamentales como la jornada laboral, los costes variables y la congestión de tráfico. Además se emplea una función objetivo basada en la rentabilidad de las operaciones de distribución, permitiendo tarifas particularizadas para cada cliente.

PALABRAS CLAVE: OPTIMIZACIÓN, TRANSPORTE, RUTAS, METAHEURÍSTICAS, SISTEMAS INTELIGENTES, VENTANAS TEMPORALES, VRPTW.

ABSTRACT: The transportation of individuals and goods generates huge economic, social and environmental costs. An adequate management of physical distribution problems directly affects the competitiveness of companies. Therefore, routing and scheduling problems which have to pickup or delivery goods to a group of customers, takes along common problems which are not solved in an optimal manner and, moreover, implies significant cuts regarding operations profitability. Taking into account this scenario, some methods of metaheuristics optimization which are commonly used in the realm of artificial intelligence are presented which, emulating natural processes, provide satisfactory solutions to hard-to-solve distribution problems. This paper poses the Vehicle Routing Problem with an Heterogeneous Fleet of Vehicles with Soft Time Windows and Multiple Use of Vehicles VRPHEMSTW, including relevant economic variables as working hours, non-fixed costs and traffic congestion. Furthermore, an objective function based on distribution operations profitability is used, allowing individualised rates for every customer.

KEYWORDS: OPTIMIZATION, TRANSPORTATION, ROUTING, METAHEURISTICS, INTELLIGENT SYSTEMS, TIME WINDOWS, VRPTW.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de personas y mercancías genera unos costes económicos, sociales y medioambientales de gran envergadura. Esta actividad supone aproximadamente un sexto del producto interior bruto de los países industrializados (ver Yepes, 2002). En España, según datos del Ministerio de Fomento (ver CTCICCP, 2001), la parti-

cipación del sector en el valor añadido bruto del año 1997 se situó en un 4,6%. En cuanto al empleo, 613.400 personas se encontraban ocupadas en el año 1999 en el sector de transportes en nuestro país, lo cual representa el 3,69% de la población activa. La distribución física representa para las empresas entre la sexta y la cuarta parte de las ventas y entre uno y dos tercios del total de los costes logísticos (Ballou, 1991).

Además de la trascendencia económica global reflejada por las magnitudes anteriores, una adecuada gestión de los problemas de distribución afecta directamente a la competitividad de las empresas. Así, el establecimiento de rutas y horarios para vehículos que deben distribuir o recoger mercancías a un grupo de clientes constituyen problemas habituales que no se resuelven de manera óptima y acarrear una merma significativa en la cuenta de resultados de las empresas. Autores como Kotler (1991) afirman que pueden conseguirse ahorros sustanciales en el área de la distribución física, y la describen como "la última frontera para obtener economías en los costes" y "el continente oscuro de la economía". Incluso el recorte de una pequeña fracción de los costes de distribución y transporte puede aflorar enormes ahorros económicos y una reducción de los impactos sociales y ambientales ocasionados por los accidentes, la contaminación y el ruido, además de incrementar significativamente la satisfacción de los requerimientos de los clientes.

La planificación y la gestión de las redes de transporte y distribución genera una gran variedad de problemas de decisión, cuyo éxito depende críticamente de la optimización de las operaciones. Sin embargo, como se verá a continuación, el espectro de soluciones posibles es enorme y además crece exponencialmente con el número de destinos y tamaño de la flota. Esta explosión combinatoria de soluciones y la complejidad de las variables y restricciones impiden que la optimización sea abordable con técnicas de resolución exactas en muchas situaciones reales. Afortunadamente, existen procedimientos alternativos que, si bien no garantizan la solución óptima, sí proporcionan soluciones de calidad a los problemas de transporte.

1.1. Modelos de distribución física y transporte

Los problemas de distribución física consisten básicamente en asignar una ruta a cada vehículo de una flota para repartir o recoger mercancías. Los clientes se localizan en puntos o arcos y a su vez pueden presentar horarios de servicio determinados; el problema consiste en establecer secuencias de clientes y programar los horarios de los vehículos de manera óptima. Los problemas reales de transporte son extraordinariamente variados. Yepes (2002) propone una clasificación que contiene un mínimo de $8,8 \cdot 10^9$ combinaciones posibles de modelos de distribución. Si alguien fuese capaz de describir en un segundo cada uno de ellos, tardaría cerca de 280 años en enunciarlos todos. La investigación científica se ha centrado, por tanto, en un grupo muy reducido de modelos teóricos que además tienden a simplificar excesivamente los problemas reales.

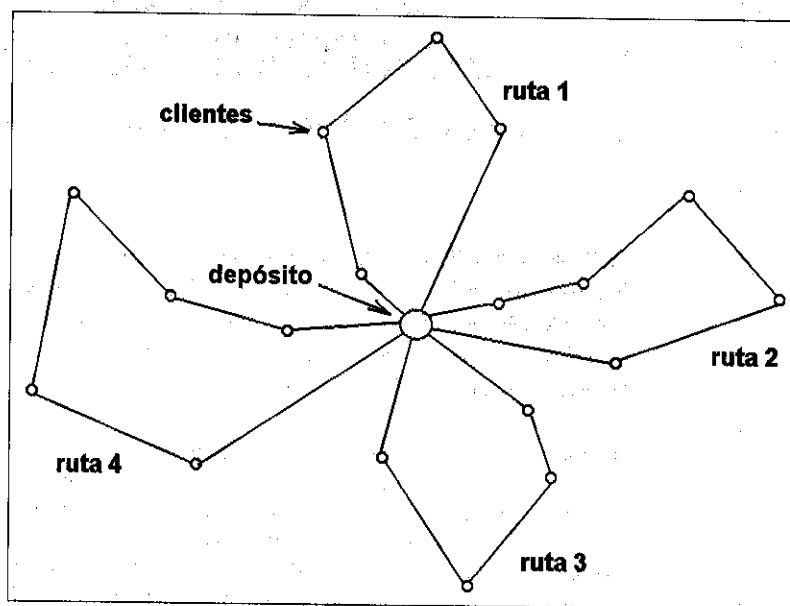


Figura 1. Aspecto de una solución al problema de rutas VRP.

El problema más famoso y sencillo de plantear se conoce como el del viajante de comercio ("Traveling Salesman Problem", TSP). Se debe visitar un conjunto de ciudades una sola vez y volver a la ciudad de partida, de modo que la distancia recorrida sea mínima. Es un problema intensivo en términos de cálculo, puesto que un procesador que calculara un billón de soluciones por segundo tardaría unos 50 minutos en enumerar todos los casos posibles con 20 nodos y casi cinco siglos con el de 25.

En el *m-TSP* "Multiple Traveling Salesmen Problem", *m* vendedores deben cubrir un número determinado de ciudades, de forma que cada destino sólo se visita por uno de ellos. Cada viaje empieza en una ciudad base que es también el final del trayecto. En este caso, se desea minorar la suma de las distancias recorridas a lo largo de todas las rutas. El número de viajeros puede ser fijo o una variable de decisión.

El problema del cartero chino "Chinese Postman Problem" (CPP), formulado por Euler en el siglo XVIII, constituye uno de los ejemplos donde la demanda está repartida a lo largo de un arco. En efecto, dado un grafo conexo, se trata de cubrir todas las aristas minimizando la distancia recorrida (permitiéndose recorrer los arcos varias veces).

El problema de las rutas "Vehicle Routing Problem, VRP" es una generalización del *m-TSP*, donde existe una demanda asociada a cada ciudad y una capacidad determinada de transporte para cada uno de los vehículos. Aquí, el objetivo puede ser reducir al mínimo posible la suma de la distancia recorrida por todas las rutas, el número de vehículos, o una combinación de ambos criterios. En algunos casos se imponen ciertas restricciones

TABLA 1. EJEMPLOS DE APLICACIONES REALES DEL PROBLEMA VRPTW

Área económica	Aplicación
Industria del automóvil	Entrega de piezas de repuesto
Prensa	Distribución de periódicos y revistas
Banca	Reparto y recogida de dinero en efectivo
Sector público	Retirada de basuras, limpieza de calles, reparto de correo
Agricultura	Recogida de ganado, leche, cereales, etc.
Materias primas	Combustible, gas natural, hormigón
Alimentación	Grandes superficies y pequeños comercios
Educación	Rutas de autobuses escolares
Planificación	Programación de actividades
Defensa	Rutas de aviones espía, logística militar
Salud	Reparto de medicamentos a farmacias
Industria	Suministro de piezas o mercancías entre almacenes
Servicios	Reparación de electrodomésticos a domicilio
Transporte	Planificación de flotas de aviones, camiones, trenes, etc.

como el número de vehículos disponibles o el total de clientes visitables en cada ruta. Es importante destacar el hecho de que tanto para los problemas TSP como para los VRP, la dirección en la cual se desarrolla el camino carece de importancia, cosa que no ocurre con los problemas de rutas de reparto con restricciones en los horarios de servicio "Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW", donde cada cliente restringe la satisfacción de su demanda a un horario de reparto o recogida determinado (ventana de tiempo). En estos casos, la ventana de tiempo obliga a una espera si el vehículo llega antes de su apertura, e impide la realización del servicio si se llega fuera del plazo previsto.

El problema VRPTW clásico se puede plantear del siguiente modo: dada una flota homogénea de vehículos localizada en un depósito central y un grupo de clientes con una demanda conocida, se debe diseñar un conjunto de rutas que empiecen y terminen en el almacén de modo que se visiten todos los clientes una sola vez al mínimo coste. Además, se deben satisfacer las restricciones de capacidad de los vehículos y el intervalo de tiempo permitido por el cliente para iniciar la carga o descarga de mercancías. La Tabla 1 recoge algunos ejemplos de aplicaciones prácticas.

Estos problemas son difíciles de resolver debido al crecimiento exponencial de soluciones en relación con el número de clientes. De hecho, sólo algunos problemas VRPTW de hasta 100 nodos han podido calcularse mediante métodos exactos. En estas circunstancias, es posible aplicar algoritmos de aproximación que proporcionen soluciones viables que sean razonables.

1.2. Algoritmos de aproximación: heurísticas y metaheurísticas

Las heurísticas constituyen métodos sencillos que proporcionan soluciones satisfactorias a un problema dado mediante algoritmos específicos. Estas técnicas explotan las características propias de un problema para buscar soluciones satisfactorias. Constituyen algoritmos a medida que no suelen ser aprovechables para un problema diferente al que fue diseñado.

En cambio, las metaheurísticas hacen referencia a métodos generales, aplicables a amplios conjuntos de problemas, que normalmente emulan estrategias eficientes empleadas por la Naturaleza y utilizados en la inteligencia artificial, (evolución biológica, funcionamiento del cerebro, comportamiento de los insectos, mecánica estadística, etc.), y que sirven para guiar el funcionamiento de las heurísticas u otros procedimientos de optimización específicos. En el campo de la optimización combinatoria y los problemas de transporte se utiliza comúnmente el nombre de metaheurística, mientras que en otros campos se conocen a estos métodos como *sistemas inteligentes* (Goonatilake *et al.*, 1995). Las redes neuronales, la lógica borrosa, los algoritmos evolutivos, la búsqueda tabú o la cristalización simulada son algunas técnicas que han probado su eficacia en la explotación de datos, en el descubrimiento de conocimiento y en la solución de problemas combinatorios en diferentes campos técnicos y científicos (ver Medina, 1999). Yepes (2002) propone una clasificación de estrategias empleadas en la resolución aproximada de problemas de optimización combinatoria que se recoge en la Figura 2 y en la Tabla 2.

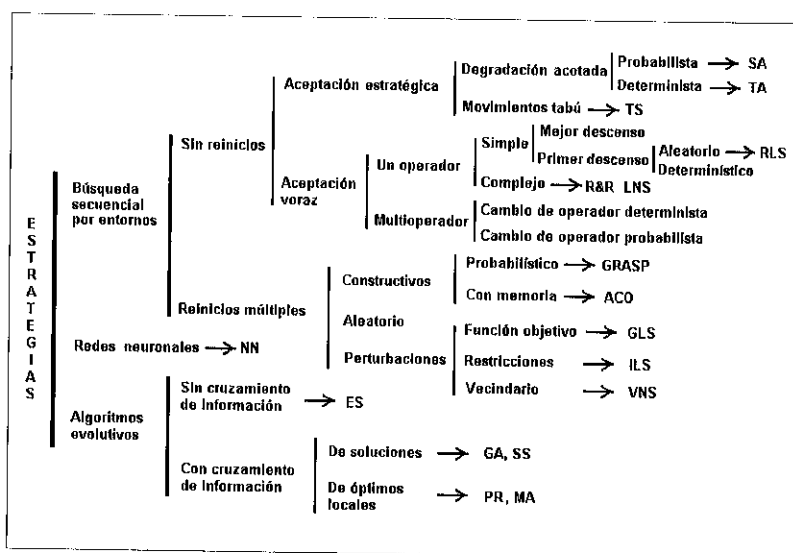


Figura 2. Taxonomía de estrategias empleadas en la resolución aproximada de problemas de optimización combinatoria sobre la base de soluciones iniciales.

TABLA 2. ACRÓNIMOS DE LAS ESTRATEGIAS EMPLEADAS EN LA FIGURA 2.

Acronimo	Strategy	Estrategia
SA	Simulated Annealing	Cristalización simulada / Recocido simulado
TA	Threshold Accepting	Aceptación por umbrales
TS	Tabu Search	Búsqueda tabú
RLS	Randomized Local Search	Descenso local aleatorio
R&R	Ruin and Recreate	Destrucción y reconstrucción de soluciones
LNS	Large Neighborhood Search	Búsqueda en entornos amplios
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure	Procedimiento de búsqueda ávido, aleatorizado y adaptativo
ACO	Ant Colony Optimization	Optimización por colonias de hormigas
GLS	Guided Local Search	Búsqueda local guiada
ILS	Iterated Local Search	Búsqueda local iterada
VNS	Variable Neighborhood Search	Búsqueda en entornos variables
NN	Neural Networks	Redes neuronales
ES	Evolution Strategies	Estrategias evolutivas
GA	Genetic Algorithms	Algoritmos genéticos
SS	Scatter Search	Búsqueda dispersa
PR	Path Relinking	Reencadenamiento de trayectorias
MA	Mametic Algorithms	Algoritmos meméticos

2. MODELO ECONÓMICO DE RUTAS DE TRANSPORTE

La investigación científica ha dedicado en las últimas décadas un gran esfuerzo orientado al desarrollo de técnicas que permitiesen resolver modelos teóricos de transporte. Sin embargo, Yepes y Medina (2000) comprueban que la maximización de la rentabilidad de las operaciones reales de distribución debe contemplar funciones objetivo económicas basadas en los ingresos y los costes. Este mismo principio debe exigirse a los algoritmos empleados en su resolución. El éxito de una metaheurística especializada en un modelo teórico concreto, no garantiza su adecuación ante escenarios reales complejos propios de las empresas de transporte.

Figura 3. Modelos necesarios para resolver un problema que se aproxima a una situación real.

AVRP	Asymmetric VRP	VRPVADT	VRP with Variable Access Time
CVRP	Capacited VRP	VRPM	VRP with Multiple Use of Vehicles
VRPLC	VRP with Length Constraint	VRPSDV	VRP with Split Delivery
FSMVRP	Fleet Size and Mix VRP	VRPTW	VRP with Time Windows
VFMVRC	Vehicle Fleet Mix with Variable Unit Run Cost	VRPSTW	VRP with Soft Time Windows
VRPHE	VRP with Heterogeneous Fleet	VRPTD	VRP with Time Deadlines

En la distribución real de mercancías, es habitual el empleo de flotas heterogéneas de vehículos, con características propias en costes, capacidad de carga, velocidad y jornadas de trabajo limitadas, con posibilidad de horas extraordinarias. Asimismo, la duración de los viajes depende del nivel de congestión y problemas de acceso a los clientes. Además, los vehículos pueden comenzar nuevas rutas si lo permite su jornada laboral, siendo esta la situación habitual cuando las demandas de cada cliente son importantes respecto a la capacidad de transporte del vehículo, o bien cuando se emplea poco tiempo en recorrer las distancias hacia los diversos nodos. También es razonable acordar con los clientes bonificaciones si se rompen los horarios (rotura de servicio).

Para definir un esquema que cumpla las características anteriores aproximadas al problema real de distribución, se precisan un mínimo de doce modelos teóricos (ver Figura 3 de Yepes, 2002). Se define un problema de rutas con flotas heterogéneas y múltiples usos con restricciones horarias blandas de servicio "Vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles with soft time windows and with multiple use of vehicles, VRPHEMSTW".

Un repaso a la literatura científica permite comprobar que se ha prestado mucha menos atención a estos problemas en relación con otros más simples tales como el VRP o el VRPTW. Algunas aproximaciones han sido la de Taillard (1999) para 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 Heterogene-

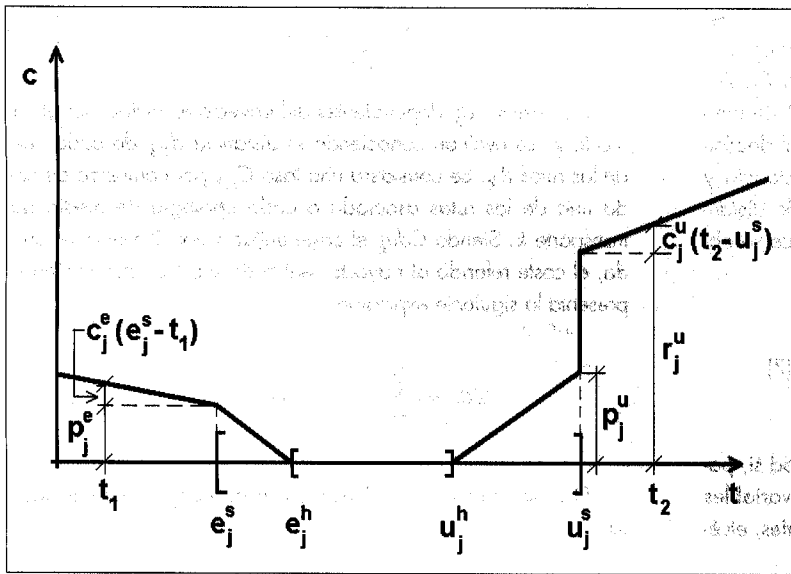


Figura 4. Modelo de penalización económica para un cliente j con ventana de tiempo flexible en la aceptación del servicio.

ous Fleet of Vehicles" (VRPHE), o la de Brandão y Mercer (1997) para los múltiples usos de los vehículos "Vehicle Routing Problem with Multiple Uses of Vehicles" (VRPM). Problemas complejos como el como el VRPHESTW, con flota heterogénea y ventanas de tiempo flexibles, o el VRPHEMSTW en el que además se permite el uso múltiple de los vehículos, han sido abordados únicamente por Yepes (2002) y Yepes y Medina (2002a, 2002b).

2.1. La flexibilización de las restricciones horarias de servicio

También han sido escasos 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 *et al.*, 1992; Balakrishnan, 1993). Sin embargo, la valoración económica de la penalización como insatisfacción del cliente, así como la ampliación del campo de las soluciones factibles, son algunos argumentos prácticos que apoyan la suavización de las ventanas de tiempo estrictas.

Se define el problema de las ventanas de tiempo 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, el horario flexible de un cliente j queda definido 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 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 4 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 abscisas el tiempo.

Las funciones empleadas por Yepes (2002) para el cálculo de los costes cuando son aplicables las penalizaciones en las ventanas de tiempo flexibles son las siguientes:

$$C_{1j}^{TW}(t) = p_j^e + c_j^e \cdot (e_j^s - t) \quad t < e_j^s \quad (1)$$

$$C_{2j}^{TW}(t) = p_j^u \cdot \left(\frac{e_j^h - t}{e_j^h - e_j^s} \right) \quad e_j^s \leq t < e_j^h \quad (2)$$

$$C_{3j}^{TW}(t) = 0 \quad e_j^s \leq t \leq u_j^s \quad (3)$$

$$C_{4j}^{TW}(t) = p_j^u \cdot \left(\frac{t - u_j^h}{u_j^s - u_j^h} \right) \quad u_j^h < t \leq u_j^s \quad (4)$$

$$C_{5j}^{TW}(t) = r_j^u + c_j^u \cdot (t - u_j^s) \quad t > u_j^s \quad (5)$$

De este modo, las penalizaciones debidas a la llegada de un vehículo al nodo j se expresan como:

$$C_j^{TW}(t) = \sum_{i=1}^5 C_{ij}^{TW}(t) \quad (6)$$

Se observa cómo los parámetros k_j^e y k_j^u modelan la dureza de las ventanas de tiempo. El horario de servicio es rígido si k_j^e y k_j^u se anulan, constituyendo los límites del intervalo los extremos severos. Los bordes exteriores constituyen los límites del intervalo flexible.

2.2. La función objetivo

Los problemas reales precisan criterios traducibles al lenguaje común de las empresas: el económico. Una primera aproximación es aquella que resuelve los problemas del transporte en términos de un menor coste, donde se evalúan las rupturas en las restricciones del modelo, incluyendo las insatisfacciones de los clientes. Por otro lado, las empresas fundamentan sus estrategias en los ingresos y en los gastos. Se trata de maximizar la rentabilidad obtenida por el conjunto de las operaciones (ver Yepes, 2002).

2.2.1. Determinación de los ingresos

Los ingresos contemplan, por un lado una tarifa fija particularizada a cada cliente j por disposición del servicio F_j . Por otro, al cliente se le cobra en función de la cantidad de mercancías q_j entregadas y de su alejamiento respecto al depósito. Sean Rq_dj , Rq_j y Rd_j la tarifa por unidad de distancia y mercancía, por unidad de mercancía y por unidad de distancia, respectivamente. El máximo nivel de ingresos I que se obtiene de la operación es:

$$I = \sum_{j=1}^N (F_j + q_j Rq_j + d_{0j} Rd_j + q_j d_{0j} Rq_dj) \quad (7)$$

Se comprueba que el modelo no pierde generalidad si, para cada cliente, se hace depender los coeficientes de variables tales como el volumen de ventas, promociones especiales, etcétera.

2.2.2. Determinación de los costes económicos

La utilización de un vehículo k de una flota de M unidades comportan unos costes fijos y otros variables. El coste de disposición de una unidad k es una magnitud constante Cf_k que incluye aspectos no dependientes de la explotación directa (por ejemplo el uso de terminales, el equipo de transporte y la administración, entre otros). Los costes variables dependen de la distancia recorrida y del tiempo empleado por cada vehículo, así como otros sobrecostes que aparecen cuando se incumplen algunas condiciones del problema. Como variables se pueden mencionar, sin ser exhaustivos, los costes asociados al combustible y la mano de obra, el mantenimiento del equipo o el manejo de la mercancía.

La legislación de cada país, el número de conductores presentes en un vehículo y otras causas diversas determinan una jornada laboral normal Hl_k para cada vehículo k . En ocasiones se alarga el día de forma excepcional, siendo He_k el periodo laboral extraordinario. El vehículo sólo dispone de la suma de las jornadas normal y extraordinaria, con costes unitarios Chl_k y $Chex_k$. La superación del límite anterior acarrea un coste horario Chp_k donde se incluirían las posibles multas por incumplimientos legales, posibles riesgos de seguridad, etc. De este modo, el coste horario Ch_k para un vehículo k se calcula de la siguiente forma:

$$Ch_k(t) = \begin{cases} Chl_k \cdot t & 0 \leq t \leq Hl_k \\ Chl_k \cdot Hl_k + Chex_k \cdot t & Hl_k < t \leq He_k \\ Chl_k \cdot Hl_k + Chex_k \cdot He_k + Chp_k \cdot t & t > He_k \end{cases} \quad (8)$$

Si T_k es el tiempo empleado por el vehículo k en un ciclo de transporte, el coste horario total Ch se expresa como suma de todos ellos:

$$Ch = \sum_{k=1}^M Ch_k(T_k) \quad (9)$$

Los costes Cd_k dependientes del trayecto recorrido por el vehículo k , se evalúan conociendo la distancia $d_{r,k}$ de cada una de las rutas R_k . Se considera una tasa $C_{r,k}$ por comienzo de cada una de las rutas asociada a cada tipología de medio de transporte k . Siendo Cdu_k el coste unitario por distancia recorrida, el coste referido al trayecto realizado y a las rutas iniciadas presenta la siguiente expresión:

$$Cd_k = r \sum_{k=1}^{R_k} C_{r,k} + Cdu_k \cdot d_{r,k} \quad (10)$$

El coste total Cd por distancias recorridas y rutas iniciadas es:

$$Cd = r \sum_{k=1}^M Cd_k \quad (11)$$

Las valoraciones económicas que implican la insatisfacción de las condiciones exigidas, constituyen para cada cliente j , un coste C_j^{tw} por penalizaciones que se evaluarán según (6). Dentro de estos sobrecostes, se añaden también los referidos al depósito. Si t_j es la hora de llegada de un vehículo al cliente k , $k=0,1,\dots,N$; el coste total Ctw debido a todos los horarios de servicio es:

$$Ctw = \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^5 C_{j,k}^{tw}(t_j) \quad (12)$$

¿Qué ocurre si se presenta la oportunidad de satisfacer parcialmente la demanda de un cliente con un resto de carga? Al vehículo le interesa descargar si el nodo está lo suficientemente cerca o le es favorable. Sin embargo el servicio fraccionado molesta al cliente, que podría aceptarlo si se le ofrece una ventaja económica. Se emplea un parámetro $Cv_{j,k}$ que penaliza la repetición en el servicio para un cliente j en función del vehículo k . Si cada nodo j es visitado $v_{j,k}$ veces por el vehículo k , y son V_j el número de clases de vehículos k que visitan j , entonces el coste total Cv por visitas es:

$$Cv = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{V_j} v_{j,k} \cdot Cv_{j,k} \quad (13)$$

Así pues, el coste total asociado a un problema de transporte se calcula como:

$$C = Ch + Cd + Ctw + Cv \quad (14)$$

Y la función objetivo B buscada, que es el beneficio obtenido por la empresa de distribución:

$$B = \sum_{i=1}^N \left[F_i + q_i R q_i + d_0 R d_i + q_i d_0 R q d_i - \sum_{k=1}^V V_{i,k} C v_{i,k} \right] - \sum_{i=0}^N \sum_{l=1}^5 C_{l,i}^{TW} (t_i) - \sum_{k=1}^M \left[C h_k (T_k) + \sum_{r=1}^{R_k} (C_{r,k} + C d u_k \cdot d_{r,k}) \right] - \sum_{i=0}^N \sum_{l=1}^5 C_{l,i}^{TW} (t_i) \quad (15)$$

2.2.3. Problemas típicos

No aparecen ejemplos en la literatura científica para resolver el VRPHEMSTW con criterios basados en el beneficio, con distintas jornadas laborales y variables de congestión (duración de la aproximación y alejamiento a cada nodo). En la Tabla 3 se definen los datos económicos y las restricciones necesarias para resolver un caso típico. Este escenario puede aplicarse, por ejemplo, a los 56 problemas de Solomon (1987), caracterizados por las coordenadas geográficas y las ventanas de tiempo en cada nodo (ver Figura 5). Los datos completos de estos problemas pueden conseguirse por internet en algunas páginas como <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.html>.

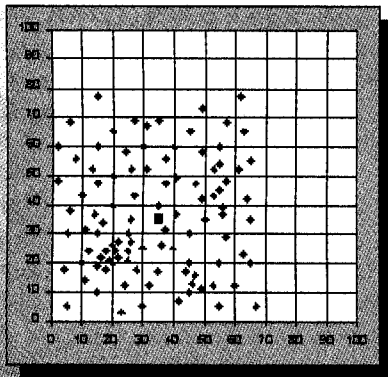
Figura 5. Distribución geográfica y características de los problemas de Solomon (1987).

3. CONSECUENCIAS DE INTERÉS PRÁCTICO

En la tesis doctoral de Yepes (2002) se analiza el modelo así planteado con una novedosa heurística de construcción secuencial y económica de rutas denominada HESECOR en combinación con un conjunto de metaheurísticas basadas en la búsqueda secuencial por entornos (cristalización simulada, aceptación por umbrales, GRASP, búsqueda convergente, búsqueda local adaptativa con múltiples operadores, búsqueda local iterada, reconstrucción de soluciones y procedimientos híbridos).

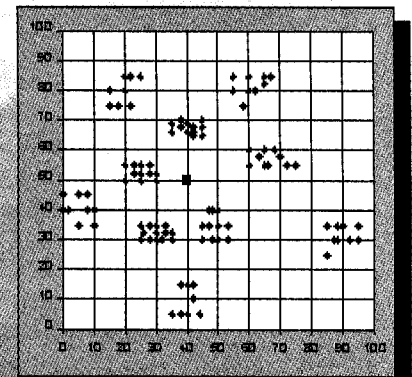
Siendo HESECOR una heurística determinística, en sólo 3 segundos de esfuerzo de cálculo, esta técnica novedosa ha conseguido alcanzar la mejor solución publicada de los problemas C101, C105 y C107 de Solomon (1987), a las cuales sólo habían llegado metaheurísticas tales como la de Rochat y Taillard (1995). Ha resultado competitiva igualmente en el resto de problemas, aportando un balance adecuado entre la calidad de los resultados obtenidos y el tiempo de cálculo empleado.

Además, se ha comprobado la pérdida de oportunidad en beneficios si se abordan los problemas con modelos teóricos. Así, la mejor solución publicada para el problema R103 de Solomon (1987) ha requerido 13 vehículos y una distancia total

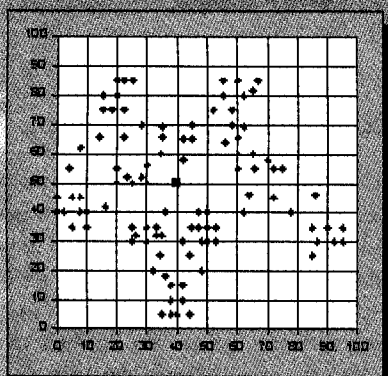


R 1 - R 2

	TW ↓	TW ↑
Aleatorio	R 1	R 2
Agrupado	C 1	C 2
Mixto	RC 1	RC 2
	Capacidad pequeña	Capacidad grande

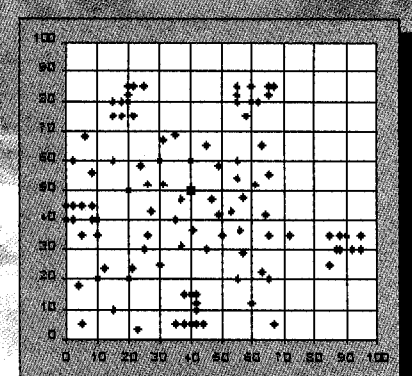


C 1



C 2

- ▶▶ 56 problemas
- ▶▶ 100 clientes
- ▶▶ 1 almacén
- ▶▶ Vehículos iguales
- ▶▶ Tiempo máximo
- ▶▶ TW 25%, 50%, 75%, 100%



RC 1 - RC 2

TABLA 3. CARACTERIZACIÓN DE LA FLOTA, DE LOS CLIENTES Y DEL DEPÓSITO.

Tipología flota	I	II	III	Características	Cliente	Depósito
Número	2	3	α	Tarifa por disposición	20000	-
Capacidad	500	200	50	Tarifa por unidad y distancia	20	-
Velocidad	0,90	1,00	1,10	Duración aproximación	1	2
Jornada normal	200	200	200	Duración servicio	10	-
Jornada extraordinaria	50	50	50	Duración alejamiento	1	2
Duración carga	8	5	3	Inicio suave TW e_j^*	$0,90e_j^*$	230
Coste disposición	75000	70000	60000	Final suave TW u_j^*	$1,05u_j^*$	250
Coste unitario distancia	150	140	130	Penalización apertura p_i^*	50	-
Coste horario normal	110	100	100	Penalización apertura k_i^*	1	-
Coste horario extra	130	120	120	Penalización espera c_i^*	10	-
Coste horario plus	160	150	150	Penalización cierre p_i^*	50000	1000
Tasa visita cliente	0	0	0	Penalización cierre k_i^*	1	1
Tasa inicio ruta	150	100	100	Coste ruptura cierre r_i^*	10^*	10^*
Número de rutas por vehículo	α	α	α	Penalización horario ruptura c_i^*	1000	10000

recorrida de 1292,68 (Shaw, 1998). Sin embargo, Yepes (2002) proporciona una opción con 14 vehículos y un recorrido de 1234,11 que aporta un beneficio superior en un 4,29% a la presentada por la solución anterior ante un escenario concreto de ingresos y costes. Ello es un reflejo de la necesidad de acudir a funciones objetivo reales para conseguir buenas soluciones. Asimismo, se han alcanzado ahorros sustanciales cuando las franjas horarias de servicio se han flexibilizado ligeramente.

Algunas de las conclusiones de interés práctico del trabajo de investigación citado y que resulta de interés para las empresas dedicadas a la distribución física de mercancías son las siguientes:

1. Los problemas reales de rutas del tipo VRPTW no se modelan bien con funciones objetivo teóricas habituales. En efecto, posibles variaciones en los costes o en las tarifas modifican la topología del espacio de soluciones y hacen que soluciones buenas a problemas teóricos resulten muy malas para los problemas reales.
2. Una empresa que quiera maximizar sus beneficios en la distribución puede generar grandes costes de oportunidad involuntarios si adopta algoritmos especializados en resolver problemas teóricos. En general, estos procedimientos no son óptimos ante escenarios reales.
3. Los modelos que utilizan funciones objetivo basadas en los costes globales y los ingresos, simulan mejor las operaciones de distribución. Cada cliente puede requerir una política de precios diferenciada.
4. Una ligera flexibilización en los horarios de servicio permite, aún cuando exista cierta penalización económica por la transgresión de las ventanas de tiempo, una mejora en la calidad de las soluciones obtenidas. En un problema VRPTW resulta conveniente dentro cierta negociación en el

cumplimiento de los horarios de entrega, compensando adecuadamente al cliente por estas molestias.

5. Un elevado coste fijo por disposición de los vehículos conlleva que la solución de mayor beneficio sea aquella que autorice el comienzo de nuevas rutas por parte de un mismo vehículo, siempre que lo permita su jornada laboral.

6. En una operación de distribución de mercancías, el uso múltiple o sencillo de los vehículos, dentro de su jornada de trabajo, es una decisión que depende de la estructura de costes de cada problema concreto.

En esta apretada síntesis del trabajo de Yepes (2002), la empresa dedicada a la distribución de personas o mercancías tiene a su disposición nuevos conceptos para la resolución de sus complejos problemas de transporte. El reto consiste en elegir entre el vasto universo de técnicas posibles aquella que sea capaz de aportar una solución de calidad dentro de un tiempo de cálculo razonable, teniendo presente que un problema de transporte determinado presenta múltiples escenarios posibles, y manejando un modelo económico adecuado a las variables y restricciones reales (ver Figura 6).

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

La distribución de personas y mercancías representa una actividad económica de una gran importancia tanto para los países como para las empresas. La decisión de la secuencia de clientes que debe visitar un vehículo, con sus horarios previstos, constituyen problemas habituales que no se resuelven de manera óptima y acarrear una merma significativa en la competitividad de las empresas. Además del coste económico, estos excesos provocan un aumento del impacto ambiental y social.



Figura 6.
Complejidad en la
resolución de los
problemas reales
de transporte con
técnicas
heurísticas.

Los problemas de rutas son difícilmente optimizables en las situaciones reales por procedimientos de resolución exactos, debido al incremento exponencial del esfuerzo de cálculo necesario en relación con la dimensión del problema. En estas circunstancias, los métodos de resolución aproximados que emulan estrategias eficientes empleadas por la Naturaleza y utilizadas en inteligencia artificial, pueden proporcionar soluciones satisfactorias en tiempos de cálculo razonables.

La variedad de modelos de transporte posibles es extremadamente alta. Por ello la investigación científica se ha centra-

do en el estudio de ciertos modelos teóricos, sencillos de plantear pero difíciles de resolver. Sin embargo, los problemas reales de transporte precisan esquemas más complejos, capaces de incorporar los condicionantes y restricciones del mundo real. Son necesarios un mínimo de 12 modelos teóricos para aproximarse al problema de las rutas heterogéneas y múltiples usos con ventanas de tiempo flexibles VRPHEMSTW, con la inclusión de la jornada laboral con costes variables y la congestión.

Los procedimientos especializados en la resolución de los problemas teóricos no son en general adecuados cuando se abordan situaciones reales. Una empresa que quiera maximizar sus beneficios en la distribución puede generar grandes costes de oportunidad involuntarios si adopta algoritmos especializados en resolver problemas teóricos. Además, sólo las funciones objetivo que maximizan la rentabilidad de las operaciones asumen los fines perseguidos por las empresas dedicadas a la distribución. Asimismo, se destaca la conveniencia de la flexibilización de las ventanas de tiempo haciendo uso de bonificaciones que valoren la insatisfacción de los clientes por incumplimientos de los horarios de entrega. Ello supone un compromiso entre el tamaño de la flota y la calidad del servicio.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología y los fondos FEDER (Proyectos: BFM2001-2759 y MAR1998-0339). ■

REFERENCIAS

- BALAKRISHNAN, N. (1993). Simple heuristics for the vehicle routing problem with soft time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 44(3): 279-287.
- BALLOU, R.H. (1991). *Logística empresarial. Control y planificación*. Ed. Díaz de Santos, Madrid.
- BRANDÃO, J.; MERCER, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 100:180-191.
- COMISIÓN DE TRANSPORTES DEL COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS (2001). *Libro Verde del Transporte en España*. Disponible en internet.
- GOONATILAKE, S.; TRELEAVEN, P. (Eds) (1995). *Intelligent Systems for Finance and Business*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- 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): 69-85.
- KOTLER, P. (1991). *Marketing Management. Analysis, Planning, Implementation, and Control*. Prentice Hall International. United Kingdom.
- MEDINA, J.R. (1999). Neural network modeling of runup and overtopping. *Coastal Structures'99* (Vol. 1): 421-429. A.A. Balkema.
- SHAW, P. (1998). Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems. *Proceedings of the Fourth International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming CP98*. Pisa, Italy. 417-431.
- SOLOMON, M.M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35(2): 254-265.
- TAILLARD, É.D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO Rech. Opér.*, 33(1): 1-14.
- YEPES, V. (2002). *Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia.
- 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.): *Actas del IV Congreso de Ingeniería del Transporte*. Vol. 2, pp. 705-710. Valencia.
- YEPES, V.; MEDINA, J.R. (2002a). Criterio económico para la optimización de rutas con flotas heterogéneas, en Ibeas, A. y Díaz, J.M. (Eds.): *Actas del V Congreso de Ingeniería del Transporte*. Vol. 2, pp. 693-700. Santander.
- YEPES, V.; MEDINA, J.R. (2002b). Optimización de rutas con flotas heterogéneas y múltiples usos de vehículos VRPHEMSTW, en Goicolea, J.M. et al. (Eds.). *Actas del V Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*. 20 pp. Madrid.