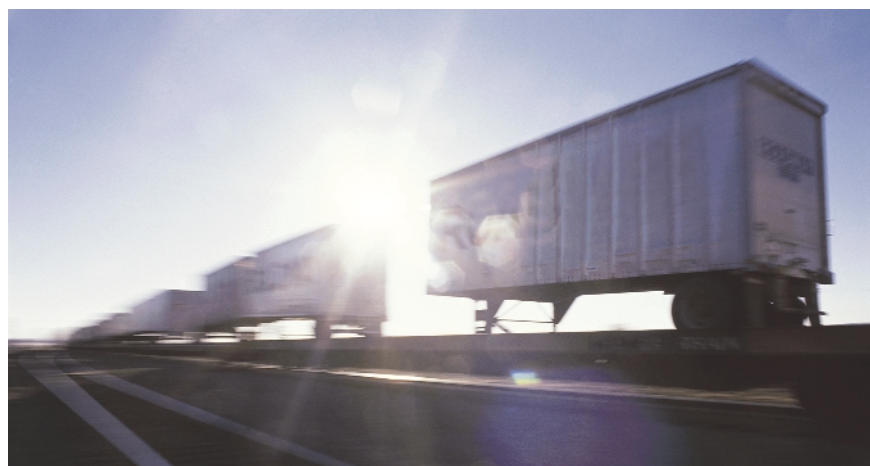


Optimización económica de redes de transporte

HOY EN DÍA LA TRASCENDENCIA ECONÓMICA DEL SECTOR DEL TRANSPORTE GENERA COSTOS SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES DE GRAN ENVERGADURA A TODOS LOS PAÍSES DEL MUNDO. LA DISTRIBUCIÓN FÍSICA DE PRODUCTOS Y MERCANCÍAS REPRESENTA PARA LAS EMPRESAS ENTRE LA SEXTA Y LA CUARTA PARTE DE LAS VENTAS Y ENTRE UNO Y DOS TERCIOS DEL TOTAL DE LOS COSTOS LOGÍSTICOS. ASÍ LAS COSAS, LOS PROBLEMAS DE DISTRIBUCIÓN AFECTAN DIRECTAMENTE A LA COMPETITIVIDAD DE LAS EMPRESAS. EL TRANSPORTE, QUE YA ES UNA FUNCIÓN VITAL DENTRO DE LAS CADENAS DE SUMINISTRO, TENDRÁ UNA POSICIÓN MÁS ESTRATÉGICA PARA LAS INDUSTRIAS EN EL FUTURO. EN LA AC-



*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia.

TUALIDAD EL ESTABLECIMIENTO DE RUTAS Y HORARIOS PARA VEHÍCULOS CONSTITUYE UN CONJUNTO DE PROBLEMAS HABITUALES QUE NO SE RESUELVEN DE MANERA ÓPTIMA Y ACARREAN UNA MERMA SIGNIFICATIVA EN LA CUENTA DE RESULTADOS DE LAS EMPRESAS, PROVOCANDO QUE ÉSTAS SE ENFRENTEN A RETOS MÁS DINÁMICOS QUE VAN DESDE AUMENTOS EN LOS NIVELES DE SERVICIO, A LAS RUPTURAS DE LAS FRONTERAS O LA ENTRADA EN EL COMERCIO ELECTRÓNICO. EN ESTAS CIRCUNSTANCIAS, LOS MÉTODOS DE RESOLUCIÓN APROXIMADOS QUE EMULAN ESTRATEGIAS EFICIENTES EMPLEADAS POR LA NATURALEZA Y UTILIZADAS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL, PUEDEN PROPORCIONAN SOLUCIONES SATISFATORIAS A LAS COMPAÑÍAS Y ES PRECISAMENTE EN ESTE TEMA QUE SE CENTRA EL DESARROLLO DEL ARTÍCULO. /VÍCTOR YEPES PIQUERAS*

TRASCENDENCIA DEL TRANSPORTE

LA TRASCENDENCIA económica del sector del transporte genera costos sociales y medioambientales de gran envergadura. Esta actividad supone aproximadamente un sexto del producto interno bruto de los países industrializados (ver Yépes, 2002). Un estudio del National Council of Physical Distribution (ver Ballou, 1991) estima que el transporte sumó un 15% del Producto Interno Bruto de Estados Unidos en 1978, constituyendo más del 45% de todos los costos logísticos de las organizaciones. En España, según datos del Ministerio de Fomento (ver CTCICCP, 2001), la participación 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 España, 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 costos logísticos (Ballou, 1991).

Además, 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 constituye un conjunto de 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 costos” y “el continente oscuro de la economía”. Drucker (1962) describió las actividades logísticas que se llevaban a cabo tras la fabricación como las “áreas peor realizadas y a la vez más prometedoras dentro del mundo industrial”. Incluso el recorte de una pequeña fracción de los costos de distribución 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 incre-

mentar significativamente la satisfacción de los clientes.

Todo ello se enmarca dentro de un escenario donde han crecido enormemente las expectativas de los clientes al igual que los productos que se encuentran en el mercado. Ello provoca que las empresas se enfrenten a retos más dinámicos que van desde aumentos en los niveles de servicio, a las rupturas de las fronteras o la entrada en el comercio electrónico. La globalización de los mercados ha provocado de hecho una aceleración del comercio. El transporte, que ya es una función vital, tendrá aún una posición más estratégica para las industrias en el futuro.

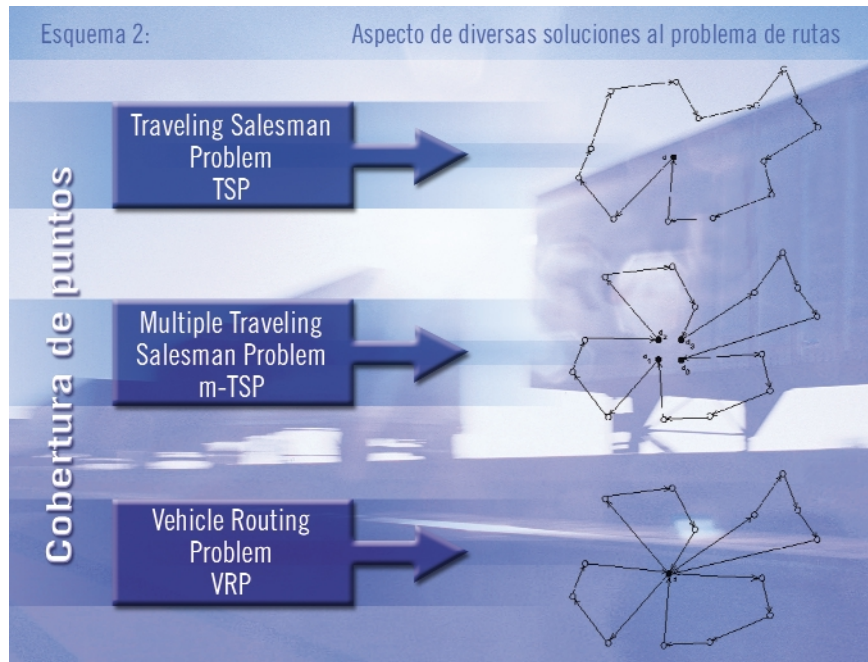
Los problemas de rutas son difícilmente optimizables en las situaciones reales por procedimientos de resolución exactos, debido al incremento exponencial del esfuerzo de cálculo necesario en relación con la dimensión del problema. En estas circunstancias, los métodos de resolución aproximados que emulan estrategias eficientes empleadas por la Naturaleza y utilizadas en inteligencia artificial, pueden proporcionar soluciones satisfactorias en tiempos de cálculo razonables, constituyendo herramientas tecnológicas capaces de incrementar la competitividad de las empresas dedicadas al transporte (ver Esquema 1).

PROBLEMAS DE DISTRIBUCIÓN FÍSICA

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. Yépes (2002) propone una clasificación que contiene un mínimo de 8,8109 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.

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 tér-





tos 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. 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.

SISTEMAS INTELIGENTES

Las metaheurísticas son 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 conocimientos y en la solución de problemas combinatorios en diferentes campos técnicos y científicos.

MODELO ECONÓMICO RUTAS DE TRANSPORTE

La investigación científica ha dedicado en las últimas décadas un gran esfuerzo orientado al desarrollo de técnicas que permitieran 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 costos. 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.

En la distribución real de mercancías, es habitual el empleo de flotas heterogéneas de vehículos, con características propias en costos, 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 vehí-

minos 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.

El problema de las rutas "Vehicle Routing Problem, VRP" presenta 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 (ver Esquema 2). 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 es-

Tabla 1. Ejemplos de aplicaciones reales del problema VRPTW.

Área económica	Aplicación
Industria	Suministro de piezas o mercancías entre almacenes
Servicios	Reparación de electrodomésticos a domicilio.
Industria del automóvil	Entrega de piezas de repuesto
Banca	Reparto y recogida de dinero en efectivo
Sector público	Retirada de basuras, limpieza de calles, reparto de correo
Defensa	Rutas de aviones-espía, logística militar
Salud	Reparto de medicamentos a farmacias
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
Prensa	Distribución de periódicos y revistas
Transporte	Planificación de flotas de aviones, camiones, trenes, etc.

Tabla 2. Acrónimos de algunas estrategias empleadas como metaheurísticas.

Acrónimo	Strategy	Estrategia
TA	Threshold Accepting	Aceptación por umbrales
TS	Tabu Search	Búsqueda tabú
SA	Simulated Annealing	Cristalización simulada / Recocido simulado
RLS	Randomized Local Search	Descenso local aleatorio
NN	Neural Networks	Redes neuronales
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
ES	Evolution Strategies	Estrategias evolutivas
GA	Genetic Algorithms	Algoritmos genéticos
SS	Scatter Search	Búsqueda dispersa
GLS	Guided Local Search	Búsqueda local guiada
ILS	Iterated Local Search	Búsqueda local iterada
VNS	Variable Neighborhood Search	Búsqueda en entornos variables
PR	Path Relinking	Reencadenamiento de trayectorias
MA	Memetic Algorithms	Algoritmos meméticos



Cuenta con una potente herramienta con capacidad para controlar y optimizar la cadena logística a nivel local, y global

www.geodis.com

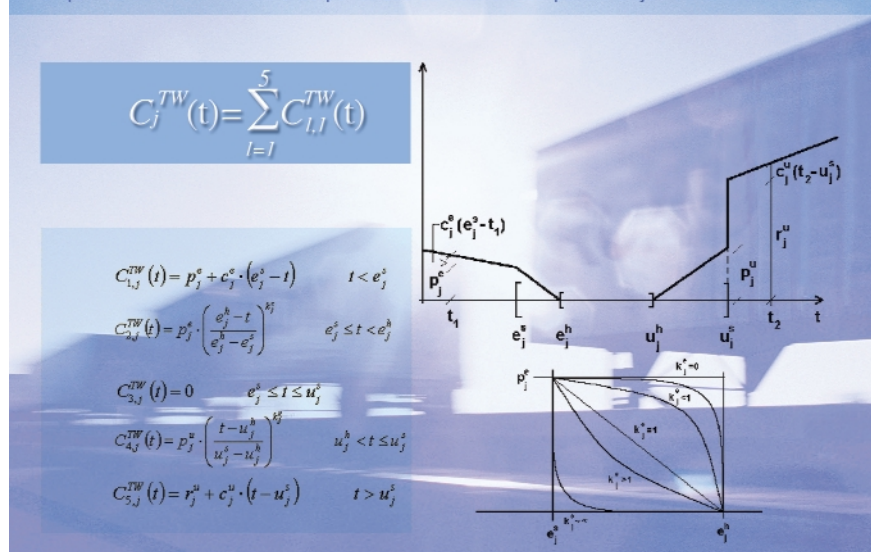
Miguel Cervantes Saavedra No. 471, PB
Col. Irrigación, C.P. 11500
México, D.F.
Tel: (52 55) 55 80 59 15
e-mail: info@geodis.com.mx



GEODIS

A TOTAL LOGISTICS RESOURCE

Esquema 3. Modelo de penalización económica para franjas horarias flexibles.



culo, 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). En el Esquema 3 se describe una ventana temporal flexible sujeta a penalizaciones económicas por incumplimientos en los horarios.

Para definir un esquema que cumpla las características anteriores apro-

ximadas al problema real de distribución, 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".

En la tabla 3 se muestra el aspecto de los datos de partida de un problema concreto.

Tipología flota	I	II	III	Características	Cliente	Depósito
Número	2	3	∞	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^s	$0,90 e_j^h$	230
Coste disposición	75000	70000	60000	Final suave TW u_j^s	$1,05 u_j^s$	250
Coste unitario distancia	150	140	130	Penalización apertura p_j^e	50	-
Coste horario normal	110	100	100	Penalización apertura k_j^e	1	-
Coste horario extra	130	120	120	Penalización espera c_j^e	10	-
Coste horario plus	160	150	150	Penalización cierre p_j^u	50000	1000
Tasa visita cliente	0	0	0	Penalización cierre k_j^u	1	1
Tasa inicio ruta	150	100	100	Coste ruptura cierre r_j^u	10^7	10^8
Número de rutas por vehículo	∞	∞	∞	Penalización horario ruptura c_j^u	1000	10000

CONSECUENCIAS DE INTERÉS PARA LAS EMPRESAS

Algunas conclusiones de interés práctico que se han comprobado al emplear los sistemas inteligentes en la resolución de problemas que, lejos de ser teóricos, se acercan a la realidad cotidiana de las empresas de distribución son las siguientes (Yepes, 2002):

Los problemas reales de rutas no se modelan bien con funciones objetivo teóricas habituales. En efecto, posibles variaciones en los costos o en las tarifas provocan que soluciones buenas a problemas teóricos resulten muy malas para los problemas reales. Como empresario debe exigir que el software que emplee maximice el beneficio, y no sólo minimice los costos.

Una empresa que quiera maximizar sus beneficios en la distribución puede generar grandes costos de oportunidad involuntarios si adopta algoritmos especializados en resolver problemas teóricos. En general, estos procedimientos no son óptimos ante escenarios reales. Mucho software es teórico y no adaptado a su empresa.

Los modelos que utilizan funciones objetivo basadas en los costos globales

y los ingresos, simulan mejor las operaciones de distribución. Cada cliente puede requerir una política de precios diferenciada. Exija a su software la posibilidad de segmentar a sus clientes con tarifas específicas.

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. Negocie con sus clientes bonificaciones por incumplimientos de los horarios de entrega, al final, ello le puede llevar a mayores beneficios.

Un elevado costo 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. Desconfíe del software que no le permita discriminar situaciones como el alquiler o la compra de vehículos. La planificación de

las rutas puede cambiar y su empresa perder beneficios.

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 costos de cada problema concreto. Esta posibilidad no se contempla por el software habitual y le puede hacer perder dinero.

En esta apretada síntesis, 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.

REFERENCIAS

Ballou, R. H. (1991). Logística empresarial. Control y planificación. Ed. Díaz de Santos, Madrid.

Comisión de Transportes del Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos (2001). Libro verde del transporte en España. Disponible en internet.

Drucker, P. (1962). The economy's dark continent. Fortune, april, 265-270.

Goonatilake, S.; Treleaven, P. (Eds) (1995). Intelligent systems for finance and business. John Wiley & Sons, Chichester, England.

Kotler, P. (1991). Marketing management. Analysis, planning, implementation, and control. Prentice Hall International. United Kingdom.

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.

En Roadway contamos con el personal y el equipo de transportación terrestre, marítima y aérea para hacer llegar tus cargas más importantes de la manera más segura a cualquier destino. Con 70 años de experiencia en E.U. y con más de 9 años en México transportamos carga consolidada, haciéndonos de esta forma la empresa internacional más segura y confiable.

La ruta directa ROADWAY Express

Queremos brindarle el mejor servicio de transportación posible. Sencillamente llámenos ahora al **01.800.874.2000**