

TESIS DOCTORAL

Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW

por

Víctor Yepes Piqueras

Dirigida por

Prof. Dr. Josep R. Medina Folgado

Valencia, 21 de mayo de 2002

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Valencia

Víctor Yepes Piqueras

© Copyright 2002

por

Víctor Yepes Piqueras

This is an authorized facsímile, made from the microfilm master copy of the original dissertation or master thesis published by UMI.

The bibliographic information for this thesis is contained in UMI's Dissertation Abstracts database, the only central source for accessing almost every doctoral dissertation accepted in North America since 1861.

UMI Number: 3071874

ISBN: 0-493-91360-2.

UMI Microform 3071874

Copyright 2003 by ProQuest Information and Learning Company.

All rights reserved. This microform edition is protected against unauthorized copying under Title 17, United States Code.

ProQuest Information and Learning Company.

300 Norht Zeeb Road

P.O. Box 1346

Ann Arbor, MI 48106-1346.

Víctor Yepes Piqueras. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España. Correo electrónico: vyepesp@cst.upv.es

Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW

Dedicado a Nieves, Lorena y Víctor José.
A mis padres, a mi hermano, familia, amigos y compañeros.
Sin ellos no hubiera sido posible este trabajo.

Prefacio

La presente Tesis Doctoral, que tiene por título “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW”, ha sido elaborada por Víctor Yepes Piqueras formando parte de los requisitos para la obtención del título de Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, una vez cubiertos los objetivos del Programa de Tercer Ciclo denominado “Optimización y Explotación de Sistemas de Transportes”.

Los trabajos han sido dirigidos por el Catedrático de Universidad Dr. Josep Ramon Medina Folgado, del Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, de la Universidad Politécnica de Valencia.

Agradecimientos

Una tesis doctoral no es un trabajo que se pueda atribuir en exclusiva a una sólo persona, y en este caso, desearía agradecer a Josep R. Medina las numerosas horas de su tiempo que me ha dedicado, así como sus certeras críticas y sugerencias, que, sin duda, han redundado positivamente en los resultados obtenidos.

Asimismo, no desearía dejar de agradecer a mi familia y amigos su comprensión por ese tiempo que les he robado, y también por su continuo apoyo. Creo, sinceramente, que una parte importante de este trabajo tiene una deuda pendiente con ellos.

Valencia, 21 de mayo de 2002

Víctor Yepes Piqueras

Resumen

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. 352 pp.

El propósito de la tesis consiste en la presentación de un modelo económico de distribución de mercancías que generalice los problemas de rutas sometidos a restricciones temporales de servicio “*vehicle routing problem with time windows*” (VRPTW) y de un conjunto de técnicas heurísticas y metaheurísticas capaces de resolverlo eficientemente. El trabajo sistematiza el conjunto de métodos de optimización heurística y establece el estado de la técnica en relación con los procedimientos empleados en la resolución del problema VRPTW y sus extensiones. Tras constatar ciertas discrepancias entre los modelos teóricos y los casos reales, la tesis define una función objetivo que mide la rentabilidad económica de las operaciones, y flexibiliza los horarios de entrega con penalizaciones que reflejen la insatisfacción de los clientes. Asimismo se contempla la posibilidad de contar con flotas heterogéneas de vehículos con costes fijos y variables diferenciados, así como capacidad de carga, velocidad y jornadas laborales distintas, y con la posibilidad del uso múltiple. Se incorpora la asimetría en la duración de los viajes, con tiempos de aproximación y de alejamiento que modulen el nivel de congestión por tráfico y otras dificultades de acceso. También es posible el ajuste de diferentes costes horarios en función de las horas extraordinarias y penalizaciones por ruptura en la llegada al depósito.

La tesis presenta una novedosa heurística de construcción secuencial de rutas basada en criterios económicos (HESECOR) capaz de resolver el modelo propuesto y que, en el caso del problema VRPTW básico, ha llegado en algunos casos a alcanzar la mejor solución publicada. También se han presentado un conjunto de metaheurísticas basadas en la búsqueda secuencial por entornos. Del análisis del comportamiento de dichas técnicas a los problemas básicos y generalizados presentados, se aportan conclusiones de interés práctico, tanto para la optimización heurística de los problemas combinatorios, como para la toma de decisiones en las empresas dedicadas al transporte.

Palabras clave

Investigación operativa, logística, redes, transporte, distribución, optimización, heurísticas, metaheurísticas, sistemas inteligentes, ventanas temporales, VRPTW.

Resum

YEPES, V. (2002). Optimització heurística econòmica aplicada a les xarxes de transport del tipus VRPTW. Tesi Doctoral. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports. Universitat Politècnica de València. 352 pp.

El propòsit de la tesi consisteix en la presentació d'un model econòmic de distribució de mercaderies que generalitze els problemes de rutes sotmesos a restriccions temporals de servei "*vehicle routing problem with time windows*" (VRPTW) i d'un conjunt de tècniques heurístiques i metaheurístiques capaces de resoldre'l eficientment. El treball sistematitza el conjunt de mètodes d'optimització heurística i estableix l'estat de la tècnica en relació amb els procediments utilitzats en la resolució del problema VRPTW i les seues extensions. Després d'haver constatat diverses discrepàncies entre els models teòrics i els casos reals, la tesi defineix una funció objectiu que mesura la rendibilitat econòmica de les operacions i flexibilitza els horaris d'entrega amb penalitzacions que reflectisquen la insatisfacció dels clients. Així mateix es contempla la possibilitat de comptar amb flotes heterogènies de vehicles amb costos fixos i variables diferenciats, així com capacitat de càrrega, velocitat i jornades laborals distintes i amb la possibilitat d'ús múltiple. S'incorpora l'asimetria en la duració dels viatges, amb temps d'aproximació i d'allunyament que modulen el nivell de congestió per trànsit i altres dificultats d'accés. També és possible l'ajust de diferents costos horaris en funció de les hores extraordinàries i penalitzacions per ruptura a l'arribada al depòsit.

La tesi presenta una novedosa heurística de construcció seqüencial de rutes basada en criteris econòmics (HESECOR) capaç de resoldre el model proposat i que, en el cas del problema VRPTW bàsic, ha arribat en alguns casos a assolir la millor solució publicada. També s'han presentat un conjunt de metaheurístiques basades en la recerca seqüencial per entorns. De l'anàlisi del comportament de les dites tècniques als problemes bàsics i generalitzats presentats, s'aporten conclusions d'interés pràctic, tant per a l'optimització heurística dels problemes combinatoris com per a la presa de decisions en les empreses dedicades al transport.

Paraules clau

Investigació operativa, logística, xarxes, transport, distribució, optimització, heurístiques, metaheurístiques, sistemes intel·ligents, finestres temporals, VRPTW.

Abstract

YEPES, V. (2002). Economic heuristic optimization applied to VRPTW type transportation networks. Doctoral Dissertation. Higher Technical School of Civil Engineering. Polytechnic University of Valencia. 352 pp.

The purpose of the thesis consists of the presentation of an economic model of goods distribution which generalizes the *vehicle routing problem with time windows* (VRPTW), along with a set of heuristic and metaheuristic techniques able to work it out efficiently. This work systematizes the set of methods of heuristic optimization and establishes the state of the technique regarding the used procedures in the solving of the VRPTW problem and its extents. After having verified certain discrepancies among the theoretical models and the real cases, the thesis defines an objective function which measures the economic profitability of the operations, and makes soft time windows using penalties which take into account customers dissatisfaction. In the same way the feasibility of using a heterogeneous fleet of vehicles with differentiated fixed and variable costs is considered, as well as the loading capacity, speed and different working hours, and, furthermore, the feasibility of multiple use. The asymmetry in the length of time of routes, with approximation and removal periods which regulated level of congestion due to traffic and other access problems, is included. It is also possible to adjust different costs derived from scheduling depending on extra-hours and penalties for breaking deadlines on the arrival to the depot.

The thesis presents a new heuristic frame of sequential route building based on economic approaches (HESECOR) able to solve the proposed model which, furthermore, and in the case of the VRPTW basic problem, has reached, in some cases, the best published solution. Also, a set of metaheuristics based on a sequential neighbourhood search is presented. Starting from the analysis of the behaviour of these techniques regarding the basic and general problems presented, conclusions of practical interest, for the heuristic optimization of combinatory problems as well as for the decision making by transportation companies, are given.

Key words

Operations research, logistics, nets, transportation, distribution, optimization, heuristics, metaheuristics, intelligent systems, time windows, VRPTW.

Notación

- Δ = diferencia entre el valor de la función objetivo del candidato y la de la solución actual.
- a_j = duración de la aproximación al nodo j .
- \mathcal{A} = conjunto de los arcos de un grafo.
- B = beneficio total asociado a un problema de transporte.
- b_j = hora en la que empieza el servicio en el nodo j .
- b_{jk} = hora en la que comienza el servicio en el nodo j , cuando llega el vehículo k .
- C = coste total asociado a un problema de transporte.
- \mathcal{C} = conjunto de clientes.
- Cd = coste total por distancias recorridas.
- Cf_k = coste de disposición de un vehículo k .
- Ch = coste horario total.
- Ch_k = coste horario del vehículo k .
- Ch_{e_k} = coste horario del vehículo k en jornada laboral extraordinaria.
- Chl_k = coste horario del vehículo k en jornada laboral normal.
- Chp_k = coste de penalización horario del vehículo k al superar la jornada extraordinaria.
- c_{ij} = coste del viaje desde el nodo i al j .
- c_j^e = penalización horaria espera ventana temporal nodo j .
- c_j^u = penalización horaria ruptura ventana temporal nodo j .
- C_0^u = penalización horaria ruptura ventana temporal en depósito.
- $C_{r,k}$ = tasa de inicio de la ruta r , asociada al vehículo k .
- Ctw = coste total debido a todos los horarios de servicio.
- $Cv_{j,k}$ = coste que penaliza la repetición del servicio para un cliente j , en función del vehículo k .

- d_{ij} = distancia desde el nodo i al j .
- e_j = hora más temprana para empezar a servir al nodo j .
- e_j^h = hora límite de inicio del servicio estricto en el nodo j .
- e_j^s = hora límite de inicio del servicio flexible en el nodo j .
- e_0 = hora más temprana para salir del depósito.
- e_0^h = hora más temprana para salir del depósito con ventana temporal estricta.
- e_0^s = hora más temprana para salir del depósito con ventana temporal flexible.
- F_j = tarifa fija que se aplica al cliente j por disposición del servicio.
- \mathcal{G} = grafo orientado
- G = factor de forma en el criterio de ahorros.
- He_k = jornada laboral extraordinaria del vehículo k .
- HI_k = jornada laboral normal del vehículo k .
- I = ingreso total asociado a un problema de transporte.
- l_j = duración del alejamiento del nodo j .
- k_j^e = coeficiente penalización apertura ventana temporal nodo j .
- k_j^μ = coeficiente penalización cierre ventana temporal nodo j .
- k_0^μ = coeficiente penalización cierre ventana temporal en depósito.
- M = número total de vehículos.
- M_s = número de vehículos del tipo s .
- n = número de clientes.
- \mathcal{N} = conjunto de todos los vértices del grafo.
- N_{ij} = atracción entre los puntos i y j en ACO.
- ρ_j^e = cota penalización apertura ventana temporal nodo j .
- ρ_j^μ = cota penalización cierre ventana temporal nodo j .
- ρ_0^μ = cota penalización cierre ventana temporal en depósito.
- Q = capacidad de carga de los vehículos.
- Q_k = capacidad de carga del vehículo k .

- q_j = unidades de demanda del cliente j .
- Rd_j = tarifa por unidad de distancia aplicada al cliente j .
- r_j^u = coste ruptura cierre ventana temporal nodo j .
- R_k = ruta recorrida por el vehículo k .
- r_0^u = coste ruptura cierre ventana temporal en depósito.
- Rq_j = tarifa por unidad de mercancía aplicada al cliente j .
- Rqd_j = tarifa por unidad de distancia y mercancía aplicada al cliente j .
- s_i = duración del servicio al nodo i .
- S_0 = duración de la carga del vehículo en el depósito.
- T = variable tiempo.
- t_k = parámetro de temperatura en la cristalización simulada.
- t_0 = temperatura inicial en la cristalización simulada.
- T_k = tiempo empleado por el vehículo k en un ciclo de transporte.
- T_0 = umbral inicial en la metaheurística de aceptación por umbrales.
- t_{ij} = duración del viaje desde el nodo i al j .
- T_{ij} = rastro de feromonas entre el nodo i y el j .
- u_j = límite horario para empezar a servir al nodo j .
- u_j^h = límite horario de servicio estricto en el nodo j .
- u_j^s = límite horario de servicio flexible en el nodo j .
- U_0 = hora límite para llegar al depósito.
- U_0^h = hora límite para llegar al depósito, con ventana temporal estricta.
- U_0^s = hora límite para llegar al depósito, con ventana temporal flexible.
- \mathcal{V} = flota de vehículos.
- V_j = número de clases de vehículos que visitan j .
- $v_{j,k}$ = número de veces que el cliente j es visitado por el vehículo k .
- v_k = velocidad media del vehículo k .
- w_{ij} = espera de un vehículo que desde el nodo i se dirige al j .
- x_{ijk} = variable de decisión binaria, que vale la unidad si existe un viaje del nodo i al j en el vehículo k .

Acrónimos

Concepto	Acrónimo	Aparece por primera vez en página
<i>Ant Colony Optimization</i>	ACO	44
Beneficio Total	BT	184
<i>Constraint Programming</i>	CP	43
<i>Chinese Postman Problem</i>	CPP	66
Coeficiente de Variación	C.V.	187
<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i>	CVRP	67
Descenso Aleatorio Adaptativo	DAA	254
Descenso Determinista con Múltiples Operadores	DDMO	35
Descenso Local Aleatorio	DLA	254
Descenso Probabilista con Múltiples Operadores	DPMO	35
Distancia Total	DT	122
<i>Evolution Strategies</i>	ES	51
<i>First Best</i>	FB	186
<i>Genetic Algorithms</i>	GA	52
<i>Global Best</i>	GB	185
<i>Great Deluge Algorithm</i>	GDA	39
<i>Guided Local Search</i>	GLS	48
<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>	GRASP	44
<i>Iterated Local Search</i>	ILS	49
Longitud de la cadena de Markov	LCM	230
<i>Large Neighborhood Search</i>	LNS	43
<i>Memetic Algorithms</i>	MA	56
<i>Multi-start Local Search</i>	MLS	118
<i>Multiple Traveling Salesmen Problem</i>	<i>m-TSP</i>	66

Continúa

Significado	Acrónimo	Aparece por primera vez en página
<i>Neural Networks</i>	NN	58
Número total de rutas	NTR	122
Número de vehículos	NV	335
<i>Path Relinking</i>	PR	55
<i>Periodic Vehicle Problem with Time Windows</i>	PVRPTW	141
<i>Randomized Local Search</i>	RLS	186
<i>Random Reactive Variable Neighborhood Search</i>	RRVNS	196
<i>Reactive Variable Neighborhood Search</i>	RVNS	116
<i>Simulated Annealing</i>	SA	37
<i>Scatter Search</i>	SS	54
<i>Threshold Accepting</i>	TA	39
Número máximo de cadenas de Markov	TCM	230
<i>Tabu Search</i>	TS	40
<i>Traveling Salesman Problem</i>	TSP	65
<i>Traveling Salesman Problem with Time Windows</i>	TSPTW	76
<i>Variable Neighborhood Search</i>	VNS	50
<i>Vehicle Routing Problem</i>	VRP	67
<i>Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows</i>	VRPBTW	142
<i>Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows</i>	VRPSTW	69
<i>Vehicle Routing Problem with Time Deadlines</i>	VRPTD	69
<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>	VRPTW	11

Contenido

Prefacio	iv
Resumen	v
Notación	viii
Acrónimos	xi
Contenido	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	2
1.2 La toma de decisiones en las empresas	4
1.3 La logística y los problemas de distribución física	5
1.4 Objetivos, contribución y estructura de la tesis	10
2. LOS PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA	14
2.1 Introducción	14
2.2 La investigación operativa	15
2.3 La modelización de un problema	16
2.4 Algoritmia y complejidad computacional	17
2.5 Optimización y programación matemática	20
2.6 Técnicas de resolución de problemas de optimización combinatoria	22
2.6.1 Algoritmos de resolución exactos	23
2.6.2 Algoritmos de resolución aproximados	25
2.6.2.1 Técnicas heurísticas	28
2.6.2.1.1 Heurísticas de construcción de soluciones factibles	30
2.6.2.1.2 Heurísticas de descomposición	30
2.6.2.1.3 Heurísticas de reducción	30
2.6.2.1.4 Heurísticas de manipulación del modelo	31
2.6.2.1.5 Heurísticas de búsqueda local	31
2.6.2.2 Metaheurísticas	33
2.6.2.2.1 Búsqueda secuencial por entornos	35

2.6.2.2.1.1	Búsqueda secuencial sin reinicios.....	37
2.6.2.2.1.1.1	Cristalización simulada.....	37
2.6.2.2.1.1.2	Algoritmos basados en umbrales	38
2.6.2.2.1.1.2.1	Aceptación por umbrales	39
2.6.2.2.1.1.2.2	Algoritmo del “Diluvio Universal”	39
2.6.2.2.1.1.2.3	Aceptación por cercanía al líder.....	40
2.6.2.2.1.1.3	Búsqueda tabú	40
2.6.2.2.1.1.4	Algoritmos de destrucción y reconstrucción	42
2.6.2.2.1.2	Búsqueda secuencial con reinicios múltiples	44
2.6.2.2.1.2.1	Grasp	45
2.6.2.2.1.2.2	Sistema de colonia de hormigas	46
2.6.2.2.1.2.3	Búsqueda local guiada	48
2.6.2.2.1.2.4	Búsqueda local iterada.....	49
2.6.2.2.1.2.5	Búsqueda en entornos variables	50
2.6.2.2.2	Algoritmos evolutivos.....	51
2.6.2.2.2.1	Sin cruzamiento de información	51
2.6.2.2.2.1.1	Estrategias evolutivas	51
2.6.2.2.2.2	Con cruzamiento de información	52
2.6.2.2.2.2.1	Algoritmos genéticos	52
2.6.2.2.2.2.2	Búsqueda dispersa.....	54
2.6.2.2.2.2.3	Reencadenamiento de trayectorias.....	55
2.6.2.2.2.2.4	Algoritmos meméticos	56
2.6.2.2.3	Redes neuronales artificiales.....	58
2.7	Evaluación de las heurísticas y las metaheurísticas.....	61
3.	MODELOS DE DISTRIBUCIÓN FÍSICA Y TRANSPORTE.....	63
3.1	Características de los problemas de asignación y programación de rutas .	63
3.2	Problemas básicos de distribución	65
4.	EL PROBLEMA DE LAS RUTAS DE VEHÍCULOS CON RESTRICCIONES EN EL HORARIO DE SERVICIO: VRPTW.....	71
4.1	Introducción	71
4.2	Modelo matemático del problema VRPTW	73
4.3	Complejidad computacional del problema VRPTW	76
4.4	Algoritmos de resolución exactos	76
4.5	Algoritmos de aproximación y heurísticas.....	78
4.5.1	Heurísticas de construcción de rutas.....	78

4.5.1.1	Algoritmos secuenciales	79
4.5.1.2	Algoritmos paralelos.....	82
4.5.2	Heurísticas de mejora de rutas	83
4.5.2.1	Taxonomía de los operadores de cambio	84
4.5.2.1.1	Movimientos dentro de una ruta	84
4.5.2.1.1.1	Intercambios k-opt.....	84
4.5.2.1.1.2	Movimiento 1-swap	85
4.5.2.1.1.3	Movimiento 1-swap*.....	86
4.5.2.1.1.4	Movimiento 1-relocate.....	86
4.5.2.1.1.5	Movimiento IOPT	87
4.5.2.1.2	Movimientos entre dos rutas	88
4.5.2.1.2.1	Movimiento λ -exchange	88
4.5.2.1.2.2	Intercambios 2-opt*	88
4.5.2.1.2.3	Intercambios 2-opt**	89
4.5.2.1.2.4	Intercambios Or-opt	89
4.5.2.1.2.5	Intercambio CROSS.....	90
4.5.2.1.2.6	Movimiento ICROSS	91
4.5.2.1.2.7	Movimiento 2-relocate.....	92
4.5.2.1.2.8	Movimiento 2-swap	92
4.5.2.1.2.9	Movimiento GENIUS	93
4.5.2.1.3	Movimientos entre tres rutas	94
4.5.2.1.3.1	Movimiento 3-swap	94
4.5.2.1.3.2	Movimiento 3-relocate.....	94
4.5.2.1.3.3	Movimiento 3-opt*	95
4.5.2.1.4	Otros movimientos	96
4.5.2.1.4.1	Transferencias cíclicas.....	96
4.5.2.1.4.2	Reconstrucción de soluciones.....	97
4.5.2.1.4.3	Salto secuencial	97
4.5.2.1.4.4	Reductor de rutas.....	98
4.5.2.1.4.5	Intercambio de vehículos	98
4.5.2.1.4.6	Sustitución de vehículos	98
4.5.2.2	Heurísticas de mejora local	99
4.5.3	Heurísticas mixtas	100
4.6	Metaheurísticas	104
4.6.1	Cristalización simulada.....	104
4.6.2	GRASP	106
4.6.3	Búsqueda tabú	106
4.6.4	Algoritmos genéticos	110
4.6.5	Estrategias evolutivas	113
4.6.6	Búsqueda dispersa.....	113
4.6.7	Sistemas de colonias de hormigas.....	114
4.6.8	Búsqueda en entornos amplios.....	115
4.6.9	Búsqueda en entornos variables	116

4.6.10	Búsqueda local guiada.....	117
4.6.11	Búsqueda local iterada.....	118
4.6.12	Algoritmos de destrucción y reconstrucción.....	118
4.6.13	Redes neuronales.....	119
4.6.14	Metaheurísticas híbridas.....	120
4.7	Comparación del comportamiento de las estrategias de optimización.....	121
4.7.1	Las heurísticas aplicadas al problema VRPTW.....	121
4.7.2	Las metaheurísticas aplicadas al VRPTW.....	123
4.8	Consideraciones al empleo de la optimización heurística en los problemas de rutas.....	131
4.9	Variantes del problema VRPTW.....	135
4.9.1	Las ventanas temporales flexibles: El VRPSTW.....	136
4.9.2	Los tiempos límite de servicio: El VRPTD.....	137
4.9.3	Las ventanas temporales múltiples: El VRPMTW.....	138
4.9.4	La flota heterogénea: El VRPHETW.....	138
4.9.5	Los múltiples usos de vehículos: El VRPMTW.....	140
4.9.6	Los depósitos múltiples: El MDVRPTW.....	141
4.9.7	Los servicios periódicos: El PVRPTW.....	141
4.9.8	El transporte de vuelta: El VRPBTW.....	142
4.9.9	Otras variantes del problema VRPTW.....	143
5.	DEFINICIÓN DEL MODELO DE PROBLEMA DE RUTAS.....	144
5.1	Ámbito de los problemas de distribución y transporte del modelo.....	144
5.2	Las ventanas temporales.....	147
5.3	Determinación del inicio del servicio y de los márgenes de viaje.....	151
5.4	La función objetivo.....	156
5.4.1	Determinación de los ingresos.....	158
5.4.2	Determinación de los costes económicos.....	160
6.	PROPUESTAS DE ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA SECUENCIAL POR ENTORNOS PARA LA RESOLUCIÓN DEL MODELO VRPTW.....	165
6.1	Comportamiento de distintas estrategias en la resolución del VRPTW con objetivo económico.....	166
6.1.1	Heurísticas de resolución de rutas con ventanas temporales.....	166
6.1.1.1	Heurística de construcción económica y secuencial de rutas (HESECOR).....	167
6.1.1.1.1	Criterios de inicio de una ruta.....	168

6.1.1.1.2	Métricas de evaluación para insertar clientes en rutas.....	171
6.1.1.1.3	Descripción de HESECOR: Heurística económica y secuencial de construcción de rutas	174
6.1.1.1.4	Aplicación de HESECOR a los problemas de Solomon (1987).177	
6.1.1.1.4.1	Influencia de los criterios de inicio e inserción	177
6.1.1.1.4.2	Aplicabilidad de la jerarquía tradicional de la calidad de las soluciones a problemas reales	181
6.1.1.2	Búsqueda local aleatoria.....	185
6.1.1.2.1	Criterios de elección de nuevas soluciones	186
6.1.1.2.2	Operadores de búsqueda local	189
6.1.1.2.3	Descenso aleatorio con múltiples operadores.....	191
6.1.1.2.4	Búsqueda aleatoria adaptativa con múltiples operadores	196
6.1.1.3	Heurística de reconstrucción de soluciones	199
6.1.1.3.1	La destrucción de una solución	200
6.1.1.3.2	Reconstrucción de soluciones.....	202
6.1.1.3.3	Análisis de problemas resueltos.....	203
6.1.1.3.3.1	Influencia del criterio de destrucción y su magnitud.....	203
6.1.1.3.3.2	Influencia de la magnitud de la destrucción y el tiempo de cálculo	205
6.1.1.3.3.3	Influencia de la calidad de la solución inicial.....	206
6.1.1.3.3.4	Influencia de la reconstrucción de soluciones con otros operadores	208
6.1.2	Metaheurísticas de resolución de rutas con ventanas temporales mediante la búsqueda secuencial por entornos	210
6.1.2.1	GRASP dirigido con búsqueda convergente.....	211
6.1.2.1.1	GRASP dirigido	211
6.1.2.1.2	Búsqueda convergente	213
6.1.2.1.3	Análisis de problemas resueltos.....	214
6.1.2.1.3.1	Influencia de la aleatoriedad de los criterios de inicio e inserción de HESECOR en la calidad de la mejor solución inicial	215
6.1.2.1.3.2	Influencia de la aleatoriedad y del número de soluciones generadas en la calidad de la mejor solución inicial	216
6.1.2.1.3.3	Influencia del tipo de función probabilista de elección en secuencias ordenadas	219
6.1.2.1.3.4	GRASP dirigido con heurística de reconstrucción.....	220
6.1.2.1.3.5	GRASP dirigido con búsqueda convergente y múltiples operadores	222
6.1.2.2	Cristalización simulada	224
6.1.2.2.1	Selección de la temperatura inicial.....	226
6.1.2.2.2	Velocidad de enfriamiento	226
6.1.2.2.3	Recalentamientos decrecientes	227
6.1.2.2.4	Análisis de resultados obtenidos	229
6.1.2.3	Aceptación por umbrales	231
6.1.2.3.1	Selección del umbral inicial	233

6.1.2.3.2	Criterios de minoración del umbral	233
6.1.2.3.3	Esquema no monótono de reducción de umbrales.....	234
6.1.2.3.4	Análisis de resultados obtenidos	235
6.1.2.3.4.1	Influencia de los reinicios en la calidad de las soluciones..	236
6.1.2.3.4.2	Influencia del umbral de aceptación inicial	237
6.1.2.3.4.3	Influencia del parámetro de vida media en la disminución exponencial del umbral	239
6.1.2.4	Búsqueda local iterada con perturbación en la velocidad.....	241
6.1.2.4.1	Perturbación en la velocidad.....	241
6.1.2.4.2	Análisis de resultados obtenidos	243
6.1.3	Metaheurísticas híbridas de resolución con ventanas temporales....	245
6.1.3.1	Híbrido H1	246
6.1.3.2	Híbrido H2	247
6.1.3.3	Híbrido H3	249
6.1.3.4	Híbrido H4	251
6.1.4	Efectividad de las estrategias de resolución de rutas con ventanas temporales	252
6.1.5	Consecuencias adicionales extraídas del empleo de estrategias que resuelven el VRPTW.....	257
6.1.5.1	Comparación con las soluciones teóricas	257
6.1.5.2	Variabilidad de los resultados obtenidos para distintos casos de problemas	259
6.1.5.3	Influencia de la estructura de ingresos y costes en la solución obtenida	261
6.1.5.4	Influencia de la relajación de los horarios de servicio en el beneficio	262
6.2	Resolución de problemas de rutas VRPTW generalizados	263
6.2.1	Problemas de rutas con restricciones temporales blandas de servicio (VRPSTW)	264
6.2.1.1	Influencia del tipo de función probabilista de elección en secuencias ordenadas.....	264
6.2.1.2	Influencia de los parámetros de penalización del inicio y del cierre de las ventanas temporales.....	266
6.2.2	Problemas de rutas con flotas heterogéneas y restricciones temporales blandas de servicio (VRPHESTW).....	269
6.2.2.1	Propuesta de metaheurísticas híbridas en dos y tres fases	269
6.2.2.2	Influencia de un incremento de coste unitario por distancia	273
6.2.2.3	Influencia de un incremento de las tarifas	275
6.2.3	Problemas de rutas con flotas heterogéneas y múltiples usos con restricciones temporales blandas de servicio (VRPHEMSTW).....	277
6.2.3.1	GRASP orientado en una heurística secuencial de construcción de rutas	278

6.2.3.2	Metaheurística de múltiples operadores y aceptación por umbrales	282
7.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	285
	Glosario de términos.....	299
	Referencias	310
	Apéndice 1. Los problemas de Solomon (1987).....	331
	Apéndice 2. Descripción de problemas del tipo VRPTW generalizadas	337
	Apéndice 3. Descripción de algunas soluciones obtenidas	343
	Apéndice 4. Conjuntos de operadores y probabilidades de elección	346
	Apéndice 5. Funciones probabilísticas de elección en secuencias ordenadas..	348
	Índice analítico	352

1. Introducción

“Sí, tú te encaras con el problema una y otra vez y sigues sin poder resolverlo, es probable que tenga una solución pero tú la ignoras”.

Camilo José Cela, Vísperas, festividad y octava de San Camilo del año 1936 en Madrid.

La modelización de los problemas de distribución presenta una terminología derivada en gran parte de la teoría de grafos. Se asume que expresiones tales como vértice, nodo, arco, camino, etc., así como otras similares son conocidas por el lector. Además, en la tesis se utilizan de forma indistinta las palabras cliente, nodo, vértice o destino, así como base, almacén y depósito. Otros conceptos clave se describen brevemente en el glosario de términos.

A efectos de la tesis, la optimización heurística hace referencia a todas las técnicas heurísticas y metaheurísticas empleadas para resolver los problemas de optimización combinatoria.

1.1 Motivación

Las organizaciones toman todos los días decisiones que afectan tanto a su quehacer cotidiano como a su futuro. Sin embargo, numerosos problemas de notable trascendencia son especialmente difíciles de resolver y, no por ello, las empresas deben dejarlos sin respuesta.

Todo ello se enmarca dentro de un escenario donde han crecido considerablemente las expectativas de los clientes al igual que la calidad de los productos que se encuentran en el mercado. Esto provoca que las empresas se enfrenten a retos dinámicos. Así, algunas de las organizaciones consideradas como líderes, aumentan la prestación de sus servicios, acuden a los mercados internacionales y aplican las nuevas tecnologías de la información, entre otras actuaciones destinadas a mejorar su posicionamiento.

El carácter cambiante del entorno empresarial provoca que las decisiones a tomar sean cada vez más complejas. La progresiva globalización de los mercados conlleva desarrollos progresivos en los intercambios comerciales. Muchas organizaciones se enfrentan en la actualidad con problemas relacionados con el movimiento de personas, mercancías o de información. El transporte pretende satisfacer los deseos de movilidad, constituyendo una función de creciente importancia estratégica para las industrias. Las redes y los flujos se deben diseñar, organizar y gestionar de modo que se alcancen objetivos tales como los deseados resultados económicos de las empresas distribuidoras, los requerimientos medioambientales y la demanda de servicio de los clientes. Los sistemas logísticos, a su vez, deben satisfacer las regulaciones legales en materia de tráfico, las leyes laborales y otras imposiciones de diversa índole. Tal crecimiento deberá contar con los problemas ambientales originados por las emisiones de gas, ruido y residuos. El diseño y la gestión de un sistema logístico

es complicada, tanto para las grandes corporaciones como para las pequeñas y medianas empresas.

La respuesta ágil y eficiente al mercado constituye una de las principales ventajas competitivas de las empresas. Una organización obtiene oportunidades si garantiza a sus clientes cualquier pedido en el menor tiempo posible y a un coste inferior al de su competencia. La calidad entre los productos se ha vuelto cada vez más homogénea, la tecnología y los materiales suelen estar disponibles en los mercados, exceptuando obviamente aquellos productos cuya superioridad se centra en la tecnología o en las patentes. Es entonces cuando el servicio marca la diferencia con la competencia. Tal y como indica el Libro Verde del Transporte en España (CTCICCP, 2001), el transporte sólo entiende de *eficiencia y eficacia*, de *funcionalidad y coordinación* y de *calidad*, y así lo consideran sus usuarios, elevados a la categoría de *clientes*.

La red de distribución constituye una de las circunstancias más relevantes para lograr estos elementos diferenciadores (Yepes, 2002). Es la forma de llevar los productos desde donde se ubica la capacidad de producción hasta el lugar donde se realiza la entrega a los clientes; pasando por uno o varios eslabones de la cadena de suministro, centros de distribución primarios y secundarios, y en algunos casos terciarios.

Pues bien, el diseño y gestión de la distribución física conlleva una multitud de decisiones que deben abordarse con métodos que permitan al gestor identificar sus oportunidades de mejora, reduciendo costes, disminuyendo el nivel de inversión necesario y mejorando el servicio hacia los clientes. En este contexto han aparecido en las últimas décadas intentos por ofrecer herramientas basadas fundamentalmente en la inteligencia artificial y en simulaciones de procesos que ocurren en la Naturaleza como son la evolución de las especies, el funcionamiento de las neuronas cerebrales, el templado de los metales, el comportamiento de los

insectos, etcétera; que han permitido afrontar de una forma robusta y eficiente los complejos problemas de decisión a los que se enfrentan las empresas. La tesis introduce la posibilidad de utilizar sistemas inteligentes como métodos apropiados para resolver problemas complejos de optimización de redes de transporte. Las nuevas tecnologías aportan, por tanto, ventajas competitivas a las empresas, ayudando en la correcta gestión de los recursos disponibles, en la toma de decisiones de control en tiempo real y en la optimización de reglas de buena práctica.

1.2 La toma de decisiones en las empresas

Los problemas aparejados con la toma de decisiones, que generalmente se presentan en las empresas, se plantean en un entorno donde los recursos son escasos (personal, presupuesto, tiempo), o donde deben cumplirse determinados requisitos mínimos (producción, horas de descanso), que condicionan la elección de la solución adecuada, ya sea en el ámbito estratégico, táctico e incluso operativo. El propósito al tomar la decisión consiste en llevar a cabo el plan propuesto de una manera óptima: costes mínimos, máximo beneficio, máxima satisfacción al cliente, etc. La resolución de estas cuestiones ha atraído la atención de numerosos investigadores, principalmente desde la Segunda Guerra Mundial.

La Investigación Operativa surge de los métodos que los científicos han aplicado para mejorar la eficacia, la efectividad y los resultados de las operaciones presentes en las complejas organizaciones industriales, administrativas, militares, sanitarias, económicas, etc. El propósito es construir modelos matemáticos que simulen aquellas situaciones reales en los que se está obligado a tomar una decisión. Una vez que se acepta una representación simplificada de una parte o del total de la realidad, los efectos de los cambios en las operaciones sometidas a

estudio pueden desarrollarse y predecirse de forma cuantitativa. Los aspectos más relevantes son la optimización y la incertidumbre. El primero de ellos se refiere a la determinación de una alternativa de decisión con la propiedad de ser mejor que cualquier otra en algún sentido (minimización de costes, maximización de beneficios, etc.). El segundo planteamiento busca predecir, con cierta probabilidad, cada disyuntiva.

Posteriormente, el esquema teórico debe validarse en función de la coherencia con los datos observados en el sistema real. Hay que asegurar que los valores tengan sentido y que las decisiones resultantes sean factibles. Por último se implementa el modelo en la práctica. Sin embargo, la decisión final debe ser moderada siempre por el criterio aportado por el equipo directivo, capaz de tomar en consideración ciertos elementos intangibles no contemplados.

1.3 La logística y los problemas de distribución física

El *National Council of Physical Distribution Management* definió, en 1979 (ver Ballou, 1991) la *gestión de la distribución física* como “*todas aquellas actividades encaminadas a la planificación, implementación y control de un flujo creciente de materias primas, recursos de producción y productos finales desde el punto de origen al de consumo*”. Entre estas tareas se encuentran el servicio al cliente, la previsión de la demanda, el control de inventarios, los servicios de reparación, el manejo de mercancías, el procesamiento de pedidos, la selección de la ubicación geográfica de las fábricas y los almacenes, las compras, el empaquetado de productos, el tratamiento de las mercancías devueltas, la recuperación y tratamiento de desperdicios, la distribución y el transporte, y el almacenamiento. Sin embargo, otros autores prefieren emplear el término de *logística empresarial*.

La importancia de la eficacia y la eficiencia de la gestión de la distribución adquiere su verdadera magnitud cuando se consideran los costes. Kotler (1991) indica que los principales elementos de los costes de la distribución física son el transporte (37%), el control de existencias (22%), el almacenamiento (21%) y otros como la recepción de órdenes, el servicio al cliente, la distribución y la administración (20%). El mismo autor cree, al igual que otros expertos, que pueden conseguirse ahorros sustanciales en el área de la distribución física, la cual ha sido descrita como *“la última frontera para obtener economías en los costes”* 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”*.

Muchas empresas sostienen que el objetivo último de la distribución física es obtener las mercancías necesarias, llevarlas a los lugares oportunos a su debido tiempo y al coste más bajo posible. Sin embargo, y tal como afirma Kotler (1991), no existe ningún sistema de distribución que pueda, simultáneamente, maximizar el servicio al cliente y minimizar los costes de distribución, puesto que lo primero supone un elevado coste de existencias, un transporte rápido y múltiples almacenes, factores que incrementan los costes. Se trata de buscar un equilibrio que contempore los intereses contrapuestos.

La gestión de la distribución física presenta una gran variedad de problemas de decisión que afectan a la planificación en el ámbito estratégico, táctico y operativo. La localización de plantas y almacenes, o la reconfiguración de la red de transporte son decisiones estratégicas, mientras que los problemas relacionados con la dimensión de la flota, o si ésta debe ser propia o alquilada pertenecen al ámbito de las decisiones tácticas. Los problemas habituales en las operaciones son: (a) el establecimiento de rutas para vehículos que, con cierta limitación de capacidad, deben distribuir o recoger mercancías a un grupo de

clientes; y (b) la programación de horarios o precedencias entre destinos para satisfacer estos recorridos.

Un estudio del *National Council of Physical Distribution* (ver Ballou, 1991) estima que el transporte sumó un 15% del Producto Interior Bruto de Estados Unidos en 1978, constituyendo más del 45% de todos los costes logísticos de las organizaciones. El sector de las empresas de servicios públicos y transportes estadounidenses movió en 1991 aproximadamente 506 millardos de dólares, según el Informe del Presidente de 1994 (ver Fisher, 1997). King y Mast (1997) señalan que la valoración anual que implican los excesos de coste en los viajes en Estados Unidos ascienden a 45 millardos de dólares. En Reino Unido, Francia y Dinamarca, por ejemplo, el transporte representa cerca del 15%, 9% y 15% del gasto nacional respectivamente (Crainic y Laporte, 1997; Larsen, 1999). En Japón, los costes logísticos suponen un 26,5% de las ventas, y los de transporte, un 13,5% (Kobayashi, 1973). Estas mismas cifras son del 14,1% y 2,5% en Australia (Stephenson, 1975), y del 16% y 5,5% en Reino Unido (Murphy, 1972). En España, según datos del Ministerio de Fomento (ver CTCICCP, 2001), la participación del sector transporte 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 del transporte público en nuestro país, lo cual supone el 3,69% de la población activa.

Existe una gran variación entre los costes logísticos de las distintas empresas. Ballou (1991) indica que estas cifras oscilan entre menos del 4% sobre las ventas en aquellas empresas que producen y distribuyen mercancías de alto valor, hasta más de un 32% en aquellas otras que lo hacen en las de bajo valor. El mismo autor apunta que los costes de transporte representan entre una tercera y dos terceras partes del total de costes logísticos. Se estima que los costes de distribución suponen casi la mitad del total de los costes logísticos en algunas industrias, y que en las de alimentación y bebidas pueden incrementar un 70% el

coste de las mercancías (De Backer *et al.*, 1997; Golden y Wasil, 1987). Además, la importancia de la programación de rutas se manifiesta claramente con el dato aportado por Halse (1992) informando que en 1989, el 76,5% de todo el transporte de mercancías se realizó con vehículos.

Así, las actividades que conforman la planificación operativa de la distribución física implican un gran número de pequeñas decisiones interrelacionadas entre sí. Además, la cifra de planes posibles crece exponencialmente con la dimensión del problema. Incluso para flotas pequeñas y con un número moderado de peticiones de transporte, la planificación es una tarea altamente compleja. Por tanto, no es de extrañar que los responsables de estos asuntos simplifiquen al máximo los problemas y utilicen procedimientos particulares para despachar sus vehículos basándose, en multitud de ocasiones en la experiencia de errores anteriores. Existe un amplio potencial de mejora claramente rentable para las unidades de negocio.

La planificación y la gestión de las redes de distribución exige la disposición de técnicas eficientes de optimización de rutas, puesto que no sólo afecta al desarrollo de las operaciones, sino que también incide en las decisiones tácticas y estratégicas (tamaño óptimo de flota, estimación de costes, políticas de publicidad y rotura de servicio, etc).

Medina y Yepes (2000) proporcionan un ejemplo práctico que muestra cómo la aplicación de técnicas de optimización condiciona críticamente el desarrollo de ciertas operaciones de distribución. Se trata de un negocio de venta de paquetes turísticos con transporte incluido; donde los precios se fijan mucho antes de que la demanda sea conocida, y donde son frecuentes las cancelaciones de última hora así como la llegada de nuevos clientes. Si el número de pasajeros es pequeño, en comparación con la máxima capacidad de carga del vehículo, los beneficios o las pérdidas generadas por el transporte dependen fuertemente de la

eficiencia del sistema de optimización de rutas. La Figura 1.1 describe la influencia de la optimización de operaciones en la planificación y gestión de redes de distribución de baja demanda.

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

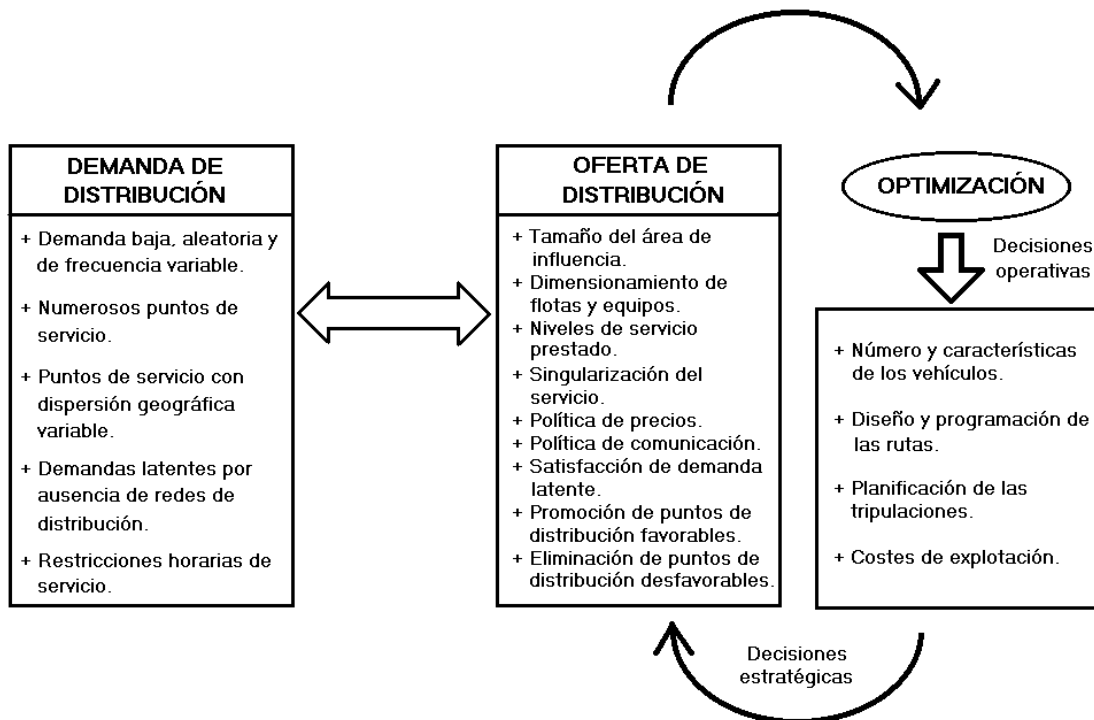


Figura 1.1. Planificación y gestión de redes de distribución. Fuente: Medina y Yepes (2000).

De esta forma, la resolución de los problemas de distribución se convierte en una de las parcelas notables de la Investigación Operativa. Incluso el recorte de una pequeña fracción de los costes puede aflorar enormes ahorros económicos y una reducción de los impactos medioambientales ocasionados por la polución y el ruido, además de incrementar significativamente la satisfacción de los requerimientos de los clientes.

1.4 Objetivos, contribución y estructura de la tesis

La gran complejidad de los problemas de distribución lleva implícito que no existan hasta el momento técnicas que resuelvan óptimamente los casos reales en tiempos de cálculo razonables. Sin embargo, los operadores del transporte deben tomar decisiones continuamente, tanto en el día a día como a medio y largo plazo. La trascendencia económica de la movilidad de personas y mercancías provoca, por tanto, la necesidad de desarrollar técnicas y estrategias que resuelvan con una velocidad razonable los problemas y que proporcionen soluciones competitivas. El objetivo principal de esta tesis es el diseño de nuevos algoritmos que permitan resolver problemas de transporte y que sean robustos, flexibles y lo suficientemente rápidos como para abordar casos que, alejándose de los esquemas teóricos, se acerquen lo más posible a las situaciones reales.

Las contribuciones que se presentan en este trabajo son las siguientes:

1. Definición de un esquema teórico de red de distribución sometido a restricciones temporales basado en el concepto de beneficio económico.
2. Propuesta de un modelo de ventanas temporales con flexibilidad adaptable.

3. Incorporación al modelo de variables tales como la congestión, las asimetrías en los viajes y las jornadas laborables sujetas a costes horarios distintos y penalizaciones.
4. Presentación de una clasificación de las estrategias heurísticas y metaheurísticas empleadas en la resolución de los problemas combinatorios.
5. Descripción de una heurística de construcción de soluciones factibles basada en criterios económicos de carácter determinístico y también probabilístico, capaz de generar amplios conjuntos de opciones con características muy diversas.
6. Adopción de operadores específicos necesarios para la resolución del problema VRPTW, pero también de sus generalizaciones a flotas heterogéneas.
7. Definición de conceptos de márgenes de viaje, esperas ineludibles y ventanas temporales efectivas.
8. Aportación de metaheurísticas basadas en la perturbación de la velocidad de los vehículos, la reconstrucción de soluciones dentro de procesos de recalentamientos en la cristalización simulada, exploración convergente y búsqueda local adaptativa de múltiples operadores basada en la aceptación por umbrales.

Las estrategias propuestas se han ensayado con los problemas planteados por Solomon (1987), modificados y complementados en algunas ocasiones para adaptar los criterios económicos o las ampliaciones del VRPTW. Los algoritmos se han programado en Visual BASIC 5.1 para su uso en ordenadores personales. El

ordenador empleado ha sido un Compaq 127Mb Ram y procesador Pentium III de 933 Mhz.

El contenido de la tesis está organizado en la forma que se expone a continuación. El capítulo 2 introduce los conceptos básicos que atañen a los problemas de optimización combinatoria, su modelización y complejidad computacional. Asimismo se describen las técnicas exactas y aproximadas empleadas en su resolución, estableciéndose una clasificación original de las estrategias heurísticas y metaheurísticas. El capítulo 3 detalla y ordena aquellas características de los modelos de distribución física y transporte, así como un mapa sobre las distintas tipologías posibles en los problemas de asignación y programación de rutas. El capítulo 4 establece el estado del arte del problema de las rutas de vehículos con restricciones en el horario de servicio (VRPTW), discutiéndose los resultados obtenidos hasta el momento y aportando ciertas conclusiones derivadas de dicho análisis. Esta sección también propone una taxonomía de los operadores y movimientos de búsqueda local, con la inclusión de algunos diseñados específicamente para este trabajo. Además se repasan las variantes posibles al VRPTW. El capítulo 5 define el esquema teórico propuesto en la tesis para resolver el problema de la planificación de rutas, detallando el ámbito de los problemas resueltos y las definiciones y nuevas aportaciones en relación con las ventanas temporales, la determinación del inicio del servicio y de los márgenes de viaje y la función objetivo basada en conceptos económicos. En el capítulo 6 se describen y analizan las propuestas de heurísticas y metaheurísticas basadas en la búsqueda por entornos para la resolución del modelo básico y posteriormente se resuelven y analizan problemas más complejos y cercanos a la realidad que el VRPTW, con la inclusión de ventanas temporales blandas de servicio, flotas heterogéneas de vehículos con la posibilidad de múltiples usos e incorporación de jornadas laborables de coste variable y la cuestión de la congestión. Asimismo, en el mismo capítulo se examina el comportamiento de las diferentes estrategias en relación con la calidad de las

Introducción

soluciones obtenidas y el tiempo empleado en su consecución. En el capítulo 7 se recogen las conclusiones de la tesis. Además de las referencias empleadas, se reúne un glosario de los términos empleados, unos apéndices donde se describen los problemas de Solomon (1987), se recogen los mejores resultados alcanzados hasta la fecha, se definen de los problemas ampliados resueltos en el capítulo 6 y las funciones de probabilidad empleadas en la selección de secuencias ordenadas. Por último se incluye un índice analítico para facilitar la consulta del trabajo.

2. Los problemas de optimización combinatoria

2.1 Introducción

La *optimización* significa hallar el valor máximo o mínimo de una cierta función, definida en un dominio. En los problemas de decisión que generalmente se presentan en la vida empresarial existen una serie de recursos escasos (personal, presupuesto, tiempo), o de requisitos mínimos a cumplir (producción, horas de descanso), que condicionan la elección de la solución adecuada, ya sea a nivel estratégico, táctico e incluso operativo. Por lo general, el propósito perseguido al tomar una decisión consiste en llevar a cabo el plan propuesto de una manera óptima: mínimos costos o máximo beneficio.

Desgraciadamente, la complejidad de las situaciones reales es de tal magnitud que en numerosas ocasiones son inviables los métodos de resolución exactos, de modo que los problemas de optimización planteados frecuentemente se resuelven con métodos aproximados que proporcionan soluciones factibles que sean satisfactorias.

Un tipo concreto de problemas de optimización son los denominados *problemas de optimización combinatoria*. En ellos, las variables de decisión son enteras y, por lo general, el espacio de soluciones está formado por ordenaciones o subconjuntos de números naturales. Su resolución será de gran trascendencia en la toma de decisiones inherentes a las redes de transporte.

2.2 La investigación operativa

La Investigación Operativa surge de la aplicación de los métodos de los científicos para mejorar la eficacia, efectividad y resultados de las operaciones que se presentan en las complejas organizaciones industriales, administrativas, militares, sanitarias, económicas, etc. Se podrían buscar sus antecedentes en las postrimerías del siglo XIX con los trabajos sobre modelos lineales debidos a Jordan, Minkowski, Farkas y otros, y también en las aportaciones de Erlang sobre fenómenos de espera en la década de los veinte, e incluso en los primeros modelos de programación lineal matemática en economía debidos a Quesnay (siglo XVIII) y Walras (siglo XIX), que fueron perfeccionados por autores como Von Neumann, Kantorovich y Dantzig.

El término “Investigación Operativa” apareció durante la Segunda Guerra Mundial en los ejércitos Británico y Norteamericano en el contexto de la resolución de problemas tácticos y estratégicos. Al terminar la contienda bélica, las técnicas pasaron a la industria, la administración, las universidades, etc.

La Investigación Operativa se fundamenta en la construcción de modelos de los sistemas reales y su análisis posterior. Las abstracciones pueden imaginarse y ajustarse a datos experimentales, o bien son estos últimos los que, tras su estudio, permiten deducir el modelo. Una vez establecido, los efectos de los cambios en las operaciones pueden desarrollarse y predecirse de forma cuantitativa. Los aspectos más trascendentes son la optimización y la incertidumbre. El primero de ellos se refiere a la determinación de una alternativa de decisión con la propiedad de ser mejor que cualquier otra en algún sentido (minimización de costes, maximización de beneficios, etc.). Sin embargo para situaciones complejas bastaría con obtener soluciones prácticas que satisfagan de alguna forma el problema. El segundo planteamiento busca predecir, con cierta probabilidad, cada alternativa de decisión. La optimización comprende la

programación matemática lineal, entera, no lineal, dinámica y el análisis determinista de decisiones; y la teoría de la probabilidad abarcaría el examen estocástico de las mismas, la programación estocástica (lineal, entera, dinámica, no lineal), la teoría de inventarios, los fenómenos de espera y la simulación. Ahora bien, en la resolución de los modelos matemáticos se pueden utilizar métodos exactos que producen soluciones óptimas que cumplen con todas las restricciones, o bien, técnicas heurísticas que proporcionan opciones viables cuasi-óptimas, útiles cuando los problemas son extremadamente complejos en su resolución dentro de tiempos de cálculo razonables.

2.3 La modelización de un problema

La Investigación Operativa trata de resolver los problemas reales analizando la abstracción o representación simplificada de una parte o segmento de la misma, denominado *modelo*. Ello es posible en la medida en que gran parte de la complejidad de un sistema real es irrelevante en su resolución. No obstante, hay que encontrar el equilibrio entre la simplicidad extrema, que impida representar adecuadamente un problema, y la complejidad en tal grado que imposibilite destacar las relaciones básicas del sistema.

Una vez definido el problema, se debe formular un modelo cuantitativo empleando métodos matemáticos y estadísticos. Estos esquemas matemáticos presentan ciertas ventajas respecto a los modelos a escala o analógicos. Permite el análisis de un número considerable de opciones con menores costes, es posible simular en breve tiempo casos que pueden tardar años en ocurrir, los cambios en el esquema teórico son fáciles de introducir, etc.

Para formular el modelo matemático se comienza estableciendo las *variables de decisión o control*, cuyos valores finales solucionarán el problema. Se

determina una *función objetivo*, expresada en términos de los datos y de las variables de decisión. Deben fijarse los límites o *restricciones* de los valores de las variables debido a las condiciones externas del problema.

Un modelo matemático se clasifica como *determinista* cuando se conocen con certeza las variables incontroladas, con frecuencia denominadas *parámetros*, que relacionan las variables de decisión con las funciones objetivo y las restricciones. En contraste, un esquema teórico *probabilístico* contiene parámetros que posiblemente tomen un rango de valores con arreglo a una distribución de probabilidades. Una vez diseñado el modelo, se debe buscar mediante algoritmos la *solución*, que es el conjunto de valores específicos para las variables de decisión que permiten identificar la opción seleccionada.

Por último, el esquema teórico debe validarse en función de la concordancia de los datos observados en el sistema real y los generados artificialmente, modificándolo si es necesario. Debe asegurarse que los valores tengan sentido y que las decisiones resultantes sean factibles. Por último se implementa el modelo en la práctica, siendo el órgano responsable de tomar la decisión el que debe valorar aspectos externos que no han sido contemplados. En estas ocasiones, la presentación de diversas opciones mejora la calidad de la decisión última.

2.4 Algoritmia y complejidad computacional

Un *algoritmo* es un conjunto prescrito de reglas o instrucciones bien definidas para la resolución de un problema. En general, se trata de encontrar el método más “eficiente”, no siendo baladí el modo de medir dicha eficiencia. Para resolver esta circunstancia, en la década de los 70 numerosos científicos se interesaron por la complejidad computacional de los problemas y los algoritmos. En muchos casos se asimila el *rendimiento algorítmico* a la medida del tiempo

medio de ejecución empleado por un procedimiento para completar su operación con un conjunto de datos. Además, es posible relacionar el esfuerzo de cálculo con la dimensión del problema a resolver.

Un algoritmo muestra una *complejidad polinómica* si necesita un tiempo $O(n^k)$, donde n muestra la dimensión de entrada y k es una constante independiente de n . Si la función que denota la complejidad no está acotada por un polinomio, el algoritmo presenta una *complejidad en tiempo exponencial*.

Un *problema de decisión* es aquel que puede ser contestado con una afirmación o una negación. Llamemos P a la clase de problemas de decisión que pueden ser resueltos en tiempo cálculo que crece de forma polinomial ante incrementos lineales del número de elementos que intervienen, y NP aquellos solubles en un tiempo polinomial indeterminado, es decir, que se puede resolver en tiempo polinomial con una máquina Turing no determinística (ordenador). Un ordenador no determinístico puede ser contemplado como un autómata capaz de ejecutar un número ilimitado (pero finito) de ejecuciones en paralelo. Sólo los problemas en P son resolubles eficientemente mediante algoritmos, no conociéndose un procedimiento polinomial de resolución para los NP , siendo obvio que $P \subseteq NP$. Si lo contrario también ocurriera, $P \supseteq NP$, querría decir que para la mayoría de los problemas de interés existen algoritmos eficientes que los resolvieran. Sin embargo, no se conoce la forma de demostrar que la igualdad $P=NP$ sea cierta, ni tampoco que haya problemas en NP que no estén en P , es decir, la existencia de algún problema en NP que no se pueda resolver en tiempo polinómico (ver Díaz *et al.*, 1996).

Un problema \mathcal{E} se dice que es *NP-completo* (NPC) si cualquier problema en NP se puede transformar en \mathcal{E} en tiempo polinomial. En este sentido, los NPC son una clase de problemas en NP muy difíciles. Si un solo problema en NPC se

resolviera en tiempo polinomial, entonces todos los problemas NP también lo harían, lo cual no está demostrado a fecha de hoy.

Sin embargo, no es necesario demostrar que un problema pertenece a NP para ofrecer evidencias de que es imposible resolverlo eficientemente. Sea Ψ un problema de decisión que no se conoce si es NP. Si un problema en NP-completo puede transformarse en Ψ , entonces Ψ no puede resolverse en tiempo polinomial (salvo que se demuestre que $P=NP$). Este problema Ψ sería como mínimo tan difícil como los NPC, llamándose NP-*hard* (NPH). Es decir, pueden existir problemas NPH que no sean NPC. A efectos prácticos únicamente nos interesa confirmar la NP-dificultad de un problema.

En la vida real existen numerosos problemas prácticos para los cuales se desconocen algoritmos eficientes, pero cuya dificultad intrínseca no ha conseguido demostrar nadie. Es posible que existan realmente algoritmos eficientes, aunque también puede ocurrir que estos problemas sean intrínsecamente difíciles; no obstante se carecen de las técnicas necesarias para demostrarlo. La importancia práctica de estos problemas ha asegurado que cada uno de ellos por separado haya sido objeto de esfuerzos sostenidos para hallar un método de solución eficiente. Por este motivo, se cree que no existen tales algoritmos. Como nadie, de momento, ha encontrado algoritmos eficientes para los problemas NP-completos, en cuanto se demuestra que un problema pertenece a esta clase, muchos investigadores tienden a pensar que no merece la pena buscar algoritmos eficientes para ellos (Lewis y Papadimitriou, 1978). Lamentablemente, muchos de los problemas importantes que aparecen en Investigación Operativa son NP-completos. En Garey y Johnson (1979) se encuentra una visión más completa de la complejidad computacional.

2.5 Optimización y programación matemática

Optimizar significa buscar la mejor manera de realizar una actividad, y en términos matemáticos, hallar el máximo o mínimo de una cierta función, definida en algún dominio. La optimización constituye un proceso para encontrar la mejor solución de un problema donde “lo mejor” se concilia con criterios establecidos previamente.

La *programación matemática* constituye un campo amplio de estudio que se ocupa de la teoría, aplicaciones y métodos computacionales para resolver los problemas de optimización condicionada. En estos modelos se busca el extremo de una función objetivo sometida a un conjunto de restricciones que deben cumplirse necesariamente. Las situaciones que pueden afrontarse con la programación matemática se suelen presentar en ingeniería, empresas comerciales y en ciencias sociales y físicas.

Con carácter general, un *programa matemático* (ver Minoux, 1986) consiste en un problema de optimización sujeto a restricciones en \mathfrak{R}^n de la forma:

$$\begin{cases} \text{minimizar } f(x) \\ \text{sujeto a} \\ g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ x \in S \subset \mathfrak{R}^n. \end{cases}$$

El vector $x \in \mathfrak{R}^n$ tiene como componentes x_1, \dots, x_n , que son desconocidas en el problema. La función f es la función objetivo y el conjunto de condiciones $g_i(x) \leq 0$ ($i = 1, \dots, m$), y $x \in S$ son las restricciones. La función objetivo muestra la calidad de la solución para un problema específico: es una expresión que sirve para reducir cada opción a un valor o cifra de mérito en términos de beneficio,

coste o cualquier otro. Se ha considerado en la formulación la minimización, ya que en el caso de maximizar basta el cambio $g = -f$.

El modelo más antiguo y más ampliamente desarrollado en el campo de la programación matemática es el lineal. La *programación lineal* estudia la optimización de una función lineal que satisface un conjunto de restricciones lineales de igualdad o desigualdad. Fue George B. Dantzig quien en 1947 concibió el *método simplex* para resolver este problema cuando trabajaba como consejero de los controladores de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, si bien en 1939 el matemático y economista soviético L.V. Kantorovich plateó y solucionó un problema de estas características relacionado con la organización y la planificación, aunque su trabajo permaneció sin conocerse hasta 1959. En realidad el término *programación lineal* fue acuñado por el también economista y matemático T.C. Koopmans en el verano de 1948, mientras paseaba con Dantzig cerca de la playa de Santa Mónica en California (ver Bazaraa, Jarvis y Sherali, 1998). Los trabajos de Dantzig se recogieron en 1951 en el libro *Activity Analysis of Production and Allocation* editado por Koopmans.

La idea del método simplex se basa en recorrer el poliedro formado por las restricciones del programa lineal, vértice a vértice, a lo largo de las aristas, hasta alcanzar el vértice óptimo. Esta idea se remonta a Fourier (1826) (ver Schrijver, 1986), si bien la mecanización algebraica del algoritmo fue propuesta por Dantzig. Sin embargo, cuando las variables que intervienen en un modelo son muchas, el tiempo de respuesta de este algoritmo no es operativo para alcanzar la solución óptima. Se resuelven con la programación lineal problemas típicos de asignación de recursos, de planificación de mano de obra, la necesidad de equipos en ejecución de proyectos, etc.

La *programación entera* trata de optimizar aquellos problemas que en algunas o todas las variables de decisión se restringen a un conjunto de valores

discretos. Es a partir de la publicación del primer algoritmo de programación lineal entera de Gomory en 1958, cuando se sientan las bases para su desarrollo, aunque ya en la década de los cuarenta se resolvió el problema del transporte (Hitchcock, 1941). Algunas aplicaciones de la programación entera solventan problemas clásicos como el de la mochila, el del viajante, la programación proyectos, la localización de recursos, etc.

El requerimiento entero sobre las variables a menudo significa que aun cuando la función objetivo y las restricciones sean lineales, el problema no pueda ser resuelto por un algoritmo de programación lineal. La razón es que no existe garantía de que los valores de las variables en la solución más favorable sean enteros. Una forma de conseguir una solución entera óptima es redondear los valores de las variables de decisión obtenidas por la programación lineal. En algunos casos, este método brinda como resultado una solución entera óptima. Sin embargo, el redondeo puede ofrecer una opción viable con un valor de función objetivo significativamente peor que el óptimo. Peor aún, puede aparecer una solución infactible. Por ello, se han desarrollado algoritmos especializados que alcanzan resultados óptimos cuando algunas variables de decisión presentan valores enteros.

2.6 Técnicas de resolución de problemas de optimización combinatoria

Los problemas de optimización en los que las variables de decisión son enteras, es decir, donde el espacio de soluciones está formado por ordenaciones o subconjuntos de números naturales, reciben el nombre de *problemas de optimización combinatoria*. En este caso, se trata de hallar el mejor valor de entre un número finito o numerable de soluciones viables. Sin embargo la enumeración

de este conjunto resulta prácticamente imposible, aún para problemas de tamaño moderado.

Las raíces históricas de la optimización combinatoria subyacen en ciertos problemas económicos: la planificación y gestión de operaciones y el uso eficiente de los recursos. Pronto comenzaron a modelizarse de esta manera aplicaciones más técnicas, y hoy vemos problemas de optimización discreta en diversas áreas: informática, gestión logística (rutas, almacenaje), telecomunicaciones, ingeniería, etc., así como para tareas variadas como el diseño de campañas de marketing, la planificación de inversiones, la división de áreas en distritos políticos, la secuenciación de genes, la clasificación de plantas y animales, el diseño de nuevas moléculas, el trazado de redes de comunicaciones, el posicionamiento de satélites, la determinación del tamaño de vehículos y las rutas de medios de transporte, la asignación de trabajadores a tareas, la construcción de códigos seguros, el diseño de circuitos electrónicos, etc. La trascendencia de estos modelos, además del elevado número de aplicaciones, estriba en el hecho de que *“contiene los dos elementos que hacen atractivo un problema a los matemáticos: planteamiento sencillo y dificultad de resolución”* (Garfinkel, 1985). En Grötschel y Lobaas (1993) se enumeran otros campos en los cuales pueden utilizarse las técnicas de optimización combinatoria.

2.6.1 Algoritmos de resolución exactos

Los algoritmos de resolución exactos tratan de asegurar la obtención de la solución óptima del problema, a riesgo de emplear un tiempo de computación excesivo, a veces no disponible. Entre ellos destacan los métodos de enumeración implícita, como los algoritmos de ramificación y acotación *“Branch & Bound”*, del plano de corte o las técnicas de programación dinámica (ver Papadimitriou y Steiglitz, 1982).

Siempre existe un procedimiento elemental para determinar la solución óptima en los problemas de tipo combinatorio, y no es otra que realizar un inventario exhaustivo del conjunto de soluciones, generando aquellas factibles, y eligiendo aquella que optimice la función objetivo. Sin embargo esta forma de operar es ineficiente, pues el número de opciones crece exponencialmente con la dimensión del problema.

La enumeración completa y sistemática de todas las posibles soluciones puede enfocarse usando una estructura de *árbol*, donde cada *nodo* muestra que algunas variables del problema se han fijado para especificar valores enteros, y cada *arco* conduce a un nuevo nodo para indicar que una nueva variable se está fijando en un valor entero específico. Siguiendo este proceso, se llegan a los *nodos terminales*, en cuyo caso se han fijado todas las variables.

Los métodos de búsqueda en árbol (o métodos de ramificación y acotación), son ampliamente utilizados, y han resuelto satisfactoriamente algunos problemas combinatorios tan difíciles como el problema del viajante (Held y Karp, 1971; Hansen y Krarup, 1974; Crowder y Padberg, 1980). La idea inicial de este procedimiento se debe a Land y Doig (1960).

Con el método de ramificación y acotación, en vez de buscar los nodos terminales directamente, se comienza en el nivel superior del árbol y se recorre nodo a nodo hacia la base del árbol y los nodos terminales. En cada nodo, se resuelve el programa lineal asociado. Sobre la base de esta solución, se toma una decisión respecto a qué nodos del árbol, si los hay, pueden eliminarse para otras consideraciones, lo que reduce el número de opciones que necesitan examinarse.

Como en cada nodo se han fijado ciertas variables en valores enteros específicos, al reemplazar todas esas variables en el modelo matemático con sus

valores asignados y eliminar temporalmente los requerimientos enteros sobre las variables restantes, puede asociarse un problema de programación lineal con cada nodo del árbol. Si no hay solución viable, se elimina ese nodo y todos los que están debajo de él, si hay solución factible, ésta será una cota inferior del problema, ya que no se cumplen todas las restricciones.

El método de ramificación y acotación termina en el momento que todos los nodos del árbol han sido examinados o eliminados. La solución óptima al problema de programación entera original es entonces la solución entera viable que produce la mayor cota inferior. En el caso de que no se encuentre ninguna solución entera factible, el problema original es infactible. La eficacia de este procedimiento depende críticamente de la calidad de los límites disponibles en cada nodo del árbol.

Una de las técnicas más potentes y sistemáticas para obtener buenas cotas inferiores consiste en resolver el problema dual obtenido por *relajación Lagrangeana* de algunas de las restricciones del problema original. Además, frecuentemente permite obtener, inicialmente, buenas soluciones aproximadas. Su empleo se inició con los trabajos de Chirstofides (1970) y Held y Karp (1971) para resolver el problema del viajante.

2.6.2 Algoritmos de resolución aproximados

Desgraciadamente, las decisiones que deben afrontar las empresas son, en ocasiones, extremadamente difíciles de tomar. Muchas veces resulta imposible resolver los problemas de optimización debido a la gran cantidad de tiempo necesario para explorar todas las soluciones. El objetivo marcado en este apartado consiste en describir y clasificar las técnicas heurísticas y metaheurísticas que, de forma aproximada, aportan soluciones satisfactorias a los

problemas de combinación combinatoria dedicando un esfuerzo de cálculo razonable.

Por ejemplo, si se quisiera establecer la ruta más corta entre los 37 aeropuertos españoles, el número de soluciones posibles es de $36!/2=1.86 \times 10^{41}$. Es más difícil encontrar una mota de polvo en la atmósfera de la Tierra (100 km de espesor y 500 millones de Km^2). Con un centenar de aeropuertos, existen más de $4,66 \times 10^{155}$ posibilidades, lo cual significa la existencia de más soluciones posibles (ver Medina, 1998) que motas de polvo de una micra caben en el Universo (esfera de 15.000 millones de años luz de radio). Si un ordenador pudiese enumerar 20 billones de soluciones en un solo segundo, tardaría poco más de 50 minutos en enumerar un problema con 20 nodos y cerca de cinco siglos con otro de 25.

Sin embargo el problema no desaparece. Se tiene que aportar algún tipo de solución para las situaciones reales, independientemente de su grado de dificultad, en un tiempo razonable. Los procedimientos de resolución aproximados, frente a los métodos exactos, exploran sólo aquellas zonas del espacio de soluciones más prometedoras, reduciendo el tiempo necesario para obtener soluciones, que aunque sean óptimos relativos, son satisfactorias a efectos prácticos. Éstos son los dominios de las técnicas heurísticas y de las metaheurísticas.

En ocasiones (ver Telfar, 1994), bajo el nombre de heurísticas se contemplan todos los procedimientos de resolución aproximados. Otras veces, algunos autores (ver Díaz *et al.*, 1996) engloban todas las técnicas heurísticas y metaheurísticas bajo el concepto de *optimización heurística*, al igual que se ha hecho en el ámbito de la tesis. No obstante, existen matices que permiten diferenciar ambos conjuntos de métodos, si bien los límites entre unos y otros en ocasiones son difusos.

Las heurísticas constituyen métodos sencillos que proporcionan soluciones satisfactorias a un problema dado mediante algoritmos específicos con procedimientos tales como los métodos constructivos, de mejora local o combinación de ambos. Estas técnicas explotan las características propias de un problema para buscar soluciones satisfactorias. Algunos autores (ver Telfar, 1994) las denominan como algoritmos a medida "*tailored algorithms*", no siendo 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 emulan estrategias eficientes empleadas por la Naturaleza o conceptos basados 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 específicos. Si bien en la optimización combinatoria, y especialmente en los problemas de transporte, se utiliza comúnmente el nombre de metaheurística, en otros campos como la explotación de datos, el descubrimiento de conocimiento, los sistemas de control, etc., se conocen a estos métodos como *sistemas inteligentes* (Goonatilake *et al.*, 1995).

La inteligencia, entendida en el sentido latino como algo privativo de los seres humanos y que comprende aspectos tales como razonar, descubrir significados, generalizar o aprender de experiencias pasadas; da paso a un sentido anglosajón, más mecanicista, cuando con dicho calificativo se designa la incorporación a un sistema o a un elemento de componentes informáticos, de equipos de control y de comunicaciones, que proporcionan un cierto nivel de conocimiento a objetos inanimados, a través de medios de captación, de transmisión y de procesamiento de datos que pueden conducir a sistemas expertos e inteligencia artificial (Sánchez, 2002). Los sistemas inteligentes constituyen procedimientos capaces de encontrar patrones y descubrir relaciones entre grandes conjuntos de datos. Las redes neuronales, la lógica borrosa, los

algoritmos evolutivos, la búsqueda tabú, la cristalización simulada son algunas técnicas que han probado ya su eficacia en la explotación de datos, en el descubrimiento de conocimiento (Fayyad *et al.*, 1996) y en la solución de problemas combinatorios difíciles en diferentes campos técnicos y científicos.

2.6.2.1 Técnicas heurísticas

Dada la dificultad práctica para resolver exactamente importantes problemas combinatorios, comenzaron a proliferar algoritmos que proporcionaban soluciones factibles que, aunque no optimizaban la función objetivo, se acercaban al valor óptimo en un tiempo de cálculo razonable, ofreciendo soluciones de gran interés práctico. Estos métodos, diseñados específicamente en cada caso, y que ofrecen opciones satisfactorias, resolviendo los problemas complejos con una rapidez adecuada, han abundado en la literatura científica en las últimas cuatro décadas.

Este tipo de algoritmos de aproximación se denominan **heurísticas**. Consisten en un conjunto bien definido de pasos que identifican con un esfuerzo de cálculo razonable una solución satisfactoria para un problema determinado. Zanakis y Evans (1981), los definen como “*procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que se supone ofrecerán una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido*”.

Los factores que pueden hacer interesante la utilización de algoritmos heurísticos para la resolución de un problema responden a diversas circunstancias (Díaz *et al.*, 1996):

- Cuando no existe un método exacto de resolución. Ofrecer entonces una solución aceptablemente buena resulta de interés, frente a no presentar ninguna alternativa.
- En el momento que es innecesaria la solución más favorable. Existen casos en que no se justifica el costo en tiempo y dinero para hallar una solución óptima que, por otra parte, no representará un beneficio importante con respecto a otra que sea simplemente satisfactoria.
- Cuando los datos son poco fiables, o bien si el modelo ha simplificado fuertemente la realidad. En estas situaciones carece de interés la búsqueda de una solución exacta, dado que de por sí ésta no será más que una aproximación.
- Cuando limitaciones de tiempo, memoria, espacio para almacenamiento de datos, etc., obligan al empleo de procedimientos de respuesta rápida, aún a costa de la precisión.
- Como paso intermedio en la aplicación de otro método. A veces se usan soluciones heurísticas como punto de partida de algoritmos exactos.

Una ventaja importante que presentan las heurísticas, respecto a las técnicas que buscan soluciones exactas, es que, por lo general, brindan una mayor flexibilidad en el manejo de las características del problema. Además, pueden ofrecer más de una solución, lo cual amplía las posibilidades de elección, sobre todo cuando existen factores que no han sido incorporados al esquema teórico, pero que también deben considerarse.

Ho (1994) atribuye el éxito de las heurísticas a la aplicación de la regla 80/20 (el 80% de la riqueza la posee el 20% de la población, unos pocos proveedores son responsables de la mayoría de los problemas de la calidad y de los retrasos en las entregas, etc.). La distribución desigual ha sido propuesta como un Principio Universal: "*pocos vitales y muchos triviales*" (Juran, 1951). De este

modo, las heurísticas evalúan normalmente un número reducido de opciones que permiten la exploración de las soluciones más interesantes.

Las técnicas heurísticas se pueden agrupar de diversas formas (ver Díaz *et al.*, 1996): Métodos constructivos, de descomposición, de reducción, de manipulación del modelo y de búsqueda local.

2.6.2.1.1 Heurísticas de construcción de soluciones factibles

Los métodos constructivos se basan en añadir paulatinamente componentes individuales a la solución, hasta que se obtiene una opción viable. Uno de los más populares lo constituyen los algoritmos voraces “*greedy*”, que construyen paso a paso la solución buscando el máximo beneficio en cada etapa.

2.6.2.1.2 Heurísticas de descomposición

Basándose en el principio de “divide y vencerás”, fragmenta el problema en otros más pequeños de forma que al resolverlos todos se obtenga una solución para el problema global. En algunos casos los problemas se resuelven en cascada, es decir, el resultado de unos son datos de los siguientes, mientras que en otras situaciones los subproblemas se consideran independientes entre sí.

2.6.2.1.3 Heurísticas de reducción

Estos métodos simplifican el problema tratando distinguir alguna característica que presumiblemente deba poseer la solución óptima.

2.6.2.1.4 Heurísticas de manipulación del modelo

Se trata de simplificar el esquema teórico para encontrar los valores de las variables de decisión con mayor facilidad, deduciendo, a partir de ella, la solución del problema original. Como posibles estrategias se puede ampliar o reducir el espacio de las opciones.

2.6.2.1.5 Heurísticas de búsqueda local

Los métodos clásicos de mejora iterativa o de búsqueda local constituyen una clase de heurísticas que se basan en la exploración del entorno “*neighborhood*” de una solución. Este ámbito está formado por las opciones generadas por una alteración de la solución actual. Mediante estos movimientos se pasa iterativamente de una solución a otra mientras no se cumpla un determinado criterio de terminación. Un procedimiento de búsqueda local queda completamente determinado al especificar un movimiento y el criterio de selección de una solución dentro del entorno.

La definición del entorno-movimiento, depende en gran medida del problema así como de la función objetivo. También se pueden definir diferentes estrategias para seleccionar una nueva solución. Uno de los criterios más simples consiste en tomar el conjunto de valores de las variables de decisión que mejore la solución actual. Este criterio de aceptación voraz permite ir mejorando la última configuración mientras sea posible. El algoritmo se detiene cuando la solución no puede mejorarse, constituyendo un óptimo local del problema respecto al entorno definido. Sin embargo, es de esperar que la solución encontrada no sea el óptimo global dada la “miopía” del procedimiento. Otro de los grandes inconvenientes de este método es la dependencia de la solución inicial. Por todo ello se emplea con menor frecuencia la estrategia de aceptación de máximo gradiente de forma aislada, integrándose, cada vez más, dentro de otras técnicas.

El algoritmo puede describirse como sigue, donde el concepto clave consiste en averiguar cómo realizar el paso de una solución factible a otra:

1. Generar una solución viable inicial T .
2. Intentar hallar una solución factible mejorada T' , por alguna transformación de T .
3. Si se localiza una solución mejorada, reemplazar T por T' y repetir desde el paso 2.
4. Si no puede encontrarse una solución mejorada, T es una solución localmente óptima.

Son posibles dos formas de elegir vorazmente una solución mejor que la actual:

- El criterio denominado como “*descenso aleatorio*” selecciona al azar una solución que mejore a la actual. Aquí se puede elegir la primera mejora en la exploración del vecindario, llamándose como “*primer descenso*”, o bien la mejor de un conjunto.
- En otras ocasiones se busca exhaustivamente en todo el entorno de la solución y se elige sólo el mínimo relativo. A esta técnica se le denomina “*mayor descenso*”.

Algunas experiencias, como las desarrolladas por Laguna *et al.* (1994), indican que el criterio de *mayor descenso* no conduce necesariamente hacia las mejores soluciones finales, pues en numerosas ocasiones el proceso puede “encajonarse” prematuramente en mínimos locales cercanos a la propuesta inicial. La estrategia del *primer descenso*, ahorra tiempo de computación al no explorar exhaustivamente las inmediaciones, y puede dirigir el trayecto de búsqueda hacia las regiones donde se encuentran las mejores soluciones.