

# **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

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

© Copyright 2002

por

Víctor Yepes Piqueras

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: [vyepes@cst.upv.es](mailto:vyepes@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'interès 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

$\Delta$	= diferencia entre el valor de la función objetivo del candidato y la de la solución actual.
$a_j$	= duración de la aproximación al nodo $j$ .
$A$	= 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.
$Ch_{l_k}$	= coste horario del vehículo $k$ en jornada laboral normal.
$Ch_{p_k}$	= 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 $k$ .
$C_{tw}$	= coste total debido a todos los horarios de servicio.
$C_{V_{j,k}}$	= 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.
- $G$  = grafo orientado
- $G$  = factor de forma en el criterio de ahorros.
- $He_k$  = jornada laboral extraordinaria del vehículo  $k$ .
- $Hl_k$  = 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  $j$ .
- $k_j^u$  = coeficiente penalización cierre ventana temporal nodo  $j$ .
- $k_0^u$  = coeficiente penalización cierre ventana temporal en depósito.
- $M$  = número total de vehículos.
- $M_s$  = número de vehículos del tipo  $s$ .
- $n$  = número de clientes.
- $N$  = conjunto de todos los vértices del grafo.
- $N_{ij}$  = atracción entre los puntos  $i$  y  $j$  en ACO.
- $p_j^e$  = cota penalización apertura ventana temporal nodo  $j$ .
- $p_j^u$  = cota penalización cierre ventana temporal nodo  $j$ .
- $p_0^u$  = 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.
$V$	= 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 $k$ .
$w_j$	= 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
Coefficiente 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

<b>Significado</b>	<b>Acrónimo</b>	<b>Aparece por primera vez en página</b>
<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 .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
2.1 Introducción.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.2 La investigación operativa .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3 La modelización de un problema .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.4 Algoritmia y complejidad computacional .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5 Optimización y programación matemática .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6 Técnicas de resolución de problemas de optimización combinatoria ..	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6.1 Algoritmos de resolución exactos .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6.2 Algoritmos de resolución aproximados....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6.2.1 Técnicas heurísticas .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6.2.1.1 Heurísticas de construcción de soluciones factibles .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6.2.1.2 Heurísticas de descomposición .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6.2.1.3 Heurísticas de reducción.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

- 2.6.2.1.4 Heurísticas de manipulación del modelo ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 2.6.2.1.5 Heurísticas de búsqueda local ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 2.6.2.2 Metaheurísticas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 2.6.2.2.1 Búsqueda secuencial por entornos **¡Error! Marcador no definido.**
      - 2.6.2.2.1.1 Búsqueda secuencial sin reinicios..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.1.1 Cristalización simulada..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.1.2 Algoritmos basados en umbrales ..... **¡Error! Marcador no definido.**
          - 2.6.2.2.1.1.2.1 Aceptación por umbrales ..... **¡Error! Marcador no definido.**
          - 2.6.2.2.1.1.2.2 Algoritmo del “Diluvio Universal”. **¡Error! Marcador no definido.**
          - 2.6.2.2.1.1.2.3 Aceptación por cercanía al líder . **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.1.3 Búsqueda tabú..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.1.4 Algoritmos de destrucción y reconstrucción ..... **¡Error! Marcador no definido.**
      - 2.6.2.2.1.2 Búsqueda secuencial con reinicios múltiples **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.2.1 Grasp..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.2.2 Sistema de colonia de hormigas..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.2.3 Búsqueda local guiada ..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.2.4 Búsqueda local iterada ..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.1.2.5 Búsqueda en entornos variables ..... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 2.6.2.2.2 Algoritmos evolutivos..... **¡Error! Marcador no definido.**
      - 2.6.2.2.2.1 Sin cruzamiento de información..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.2.1.1 Estrategias evolutivas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
      - 2.6.2.2.2.2 Con cruzamiento de información ..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.2.2.1 Algoritmos genéticos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.2.2.2 Búsqueda dispersa ..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.2.2.3 Reencadenamiento de trayectorias... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 2.6.2.2.2.2.4 Algoritmos meméticos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 2.6.2.2.3 Redes neuronales artificiales..... **¡Error! Marcador no definido.**
- 2.7 Evaluación de las heurísticas y las metaheurísticas ..... **¡Error! Marcador no definido.**

- 3. MODELOS DE DISTRIBUCIÓN FÍSICA Y TRANSPORTE.....**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 3.1 Características de los problemas de asignación y programación de rutas **¡Error! Marcador no definido.**
  - 3.2 Problemas básicos de distribución.....**¡Error! Marcador no definido.**
  
- 4. EL PROBLEMA DE LAS RUTAS DE VEHÍCULOS CON RESTRICCIONES EN EL HORARIO DE SERVICIO: VRPTW. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
  - 4.1 Introducción.....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.2 Modelo matemático del problema VRPTW ....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.3 Complejidad computacional del problema VRPTW ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.4 Algoritmos de resolución exactos .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.5 Algoritmos de aproximación y heurísticas.....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 4.5.1 Heurísticas de construcción de rutas .....**¡Error! Marcador no definido.**
      - 4.5.1.1 Algoritmos secuenciales .....**¡Error! Marcador no definido.**
      - 4.5.1.2 Algoritmos paralelos .....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 4.5.2 Heurísticas de mejora de rutas .....**¡Error! Marcador no definido.**
      - 4.5.2.1 Taxonomía de los operadores de cambio..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 4.5.2.1.1 Movimientos dentro de una ruta ....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.1.1 Intercambios k-opt.....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.1.2 Movimiento 1-swap .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.1.3 Movimiento 1-swap\* .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.1.4 Movimiento 1-relocate .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.1.5 Movimiento IOPT.....**¡Error! Marcador no definido.**
        - 4.5.2.1.2 Movimientos entre dos rutas .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.1 Movimiento  $\lambda$ -exchange .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.2 Intercambios 2-opt\* .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.3 Intercambios 2-opt\*\* .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.4 Intercambios Or-opt .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.5 Intercambio CROSS .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.6 Movimiento ICROSS.....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.7 Movimiento 2-relocate .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.8 Movimiento 2-swap .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.2.9 Movimiento GENIUS.....**¡Error! Marcador no definido.**
        - 4.5.2.1.3 Movimientos entre tres rutas .....**¡Error! Marcador no definido.**
          - 4.5.2.1.3.1 Movimiento 3-swap .....**¡Error! Marcador no definido.**

4.5.2.1.3.2	Movimiento 3-relocate .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.3.3	Movimiento 3-opt* .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.4	Otros movimientos .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.4.1	Transferencias cíclicas .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.4.2	Reconstrucción de soluciones .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.4.3	Salto secuencial .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.4.4	Reductor de rutas .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.4.5	Intercambio de vehículos .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.1.4.6	Sustitución de vehículos .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.2.2	Heurísticas de mejora local .....	¡Error! Marcador no definido.
4.5.3	Heurísticas mixtas .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6	Metaheurísticas .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.1	Cristalización simulada .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.2	GRASP .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.3	Búsqueda tabú .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.4	Algoritmos genéticos .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.5	Estrategias evolutivas .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.6	Búsqueda dispersa .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.7	Sistemas de colonias de hormigas .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.8	Búsqueda en entornos amplios .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.9	Búsqueda en entornos variables .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.10	Búsqueda local guiada .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.11	Búsqueda local iterada .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.12	Algoritmos de destrucción y reconstrucción .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.13	Redes neuronales .....	¡Error! Marcador no definido.
4.6.14	Metaheurísticas híbridas .....	¡Error! Marcador no definido.
4.7	Comparación del comportamiento de las estrategias de optimización .....	¡Error! Marcador no definido.
4.7.1	Las heurísticas aplicadas al problema VRPTW .....	¡Error! Marcador no definido.
4.7.2	Las metaheurísticas aplicadas al VRPTW .....	¡Error! Marcador no definido.
4.8	Consideraciones al empleo de la optimización heurística en los problemas de rutas. ....	¡Error! Marcador no definido.
4.9	Variantes del problema VRPTW .....	¡Error! Marcador no definido.
4.9.1	Las ventanas temporales flexibles: El VRPSTW .....	¡Error! Marcador no definido.
4.9.2	Los tiempos límite de servicio: El VRPTD .....	¡Error! Marcador no definido.



- 4.9.3 Las ventanas temporales múltiples: El VRPMTW .. **¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.9.4 La flota heterogénea: El VRPHETW ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.9.5 Los múltiples usos de vehículos: El VRPMTW ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.9.6 Los depósitos múltiples: El MDVRPTW .. **¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.9.7 Los servicios periódicos: El PVRPTW .... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.9.8 El transporte de vuelta: El VRPBTW ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 4.9.9 Otras variantes del problema VRPTW .... **¡Error! Marcador no definido.**
5. DEFINICIÓN DEL MODELO DE PROBLEMA DE RUTAS..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 5.1 Ámbito de los problemas de distribución y transporte del modelo..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 5.2 Las ventanas temporales ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 5.3 Determinación del inicio del servicio y de los márgenes de viaje ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 5.4 La función objetivo ..... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 5.4.1 Determinación de los ingresos..... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 5.4.2 Determinación de los costes económicos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6. PROPUESTAS DE ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA SECUENCIAL POR ENTORNOS PARA LA RESOLUCIÓN DEL MODELO VRPTW ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- 6.1 Comportamiento de distintas estrategias en la resolución del VRPTW con objetivo económico ..... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.1 Heurísticas de resolución de rutas con ventanas temporales ..... **¡Error! Marcador no definido.**
      - 6.1.1.1 Heurística de construcción económica y secuencial de rutas (HESECOR) ..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 6.1.1.1.1 Criterios de inicio de una ruta..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 6.1.1.1.2 Métricas de evaluación para insertar clientes en rutas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 6.1.1.1.3 Descripción de HESECOR: Heurística económica y secuencial de construcción de rutas..... **¡Error! Marcador no definido.**
        - 6.1.1.1.4 Aplicación de HESECOR a los problemas de Solomon (1987). **¡Error! Marcador no definido.**

- 6.1.1.1.4.1 Influencia de los criterios de inicio e inserción ..... **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.1.1.4.2 Aplicabilidad de la jerarquía tradicional de la calidad de las soluciones a problemas reales.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.1.2 Búsqueda local aleatoria.....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.1.2.1 Criterios de elección de nuevas soluciones... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.1.2.2 Operadores de búsqueda local .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.1.2.3 Descenso aleatorio con múltiples operadores ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.1.2.4 Búsqueda aleatoria adaptativa con múltiples operadores .... **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.1.3 Heurística de reconstrucción de soluciones ....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.1.3.1 La destrucción de una solución .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.1.3.2 Reconstrucción de soluciones .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.1.3.3 Análisis de problemas resueltos .....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.1.3.3.1 Influencia del criterio de destrucción y su magnitud ..... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.1.3.3.2 Influencia de la magnitud de la destrucción y el tiempo de cálculo .....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.1.3.3.3 Influencia de la calidad de la solución inicial **¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.1.3.3.4 Influencia de la reconstrucción de soluciones con otros operadores .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.2 Metaheurísticas de resolución de rutas con ventanas temporales mediante la búsqueda secuencial por entornos.....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.1 GRASP dirigido con búsqueda convergente ... **¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.2.1.1 GRASP dirigido.....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.2.1.2 Búsqueda convergente .....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.2.1.3 Análisis de problemas resueltos .....**¡Error! Marcador no definido.**
      - 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.... **¡Error! Marcador no definido.**
      - 6.1.2.1.3.2 Influencia de la aleatoriedad y del número de soluciones generadas en la calidad de la mejor solución inicial.. **¡Error! Marcador no definido.**
      - 6.1.2.1.3.3 Influencia del tipo de función probabilista de elección en secuencias ordenadas .....**¡Error! Marcador no definido.**
      - 6.1.2.1.3.4 GRASP dirigido con heurística de reconstrucción ..... **¡Error! Marcador no definido.**
      - 6.1.2.1.3.5 GRASP dirigido con búsqueda convergente y múltiples operadores .....**¡Error! Marcador no definido.**

- 6.1.2.2 Cristalización simulada .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.2.1 Selección de la temperatura inicial.**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.2.2 Velocidad de enfriamiento .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.2.3 Recalentamientos decrecientes .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.2.4 Análisis de resultados obtenidos ....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.2.3 Aceptación por umbrales .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.3.1 Selección del umbral inicial .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.3.2 Criterios de minoración del umbral.**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.3.3 Esquema no monótono de reducción de umbrales ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.3.4 Análisis de resultados obtenidos ....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.2.3.4.1 Influencia de los reinicios en la calidad de las soluciones  
**¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.2.3.4.2 Influencia del umbral de aceptación inicial....**¡Error! Marcador no definido.**
    - 6.1.2.3.4.3 Influencia del parámetro de vida media en la disminución exponencial del umbral.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.2.4 Búsqueda local iterada con perturbación en la velocidad ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.4.1 Perturbación en la velocidad .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.2.4.2 Análisis de resultados obtenidos ....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.3 Metaheurísticas híbridas de resolución con ventanas temporales **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.3.1 Híbrido H1 .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.3.2 Híbrido H2 .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.3.3 Híbrido H3 .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.3.4 Híbrido H4 .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.4 Efectividad de las estrategias de resolución de rutas con ventanas temporales .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.1.5 Consecuencias adicionales extraídas del empleo de estrategias que resuelven el VRPTW .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.5.1 Comparación con las soluciones teóricas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.5.2 Variabilidad de los resultados obtenidos para distintos casos de problemas .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.5.3 Influencia de la estructura de ingresos y costes en la solución obtenida .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.1.5.4 Influencia de la relajación de los horarios de servicio en el beneficio .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.2 Resolución de problemas de rutas VRPTW generalizados **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.2.1 Problemas de rutas con restricciones temporales blandas de servicio (VRPSTW) .....**¡Error! Marcador no definido.**

- 6.2.1.1 Influencia del tipo de función probabilista de elección en secuencias ordenadas .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.2.1.2 Influencia de los parámetros de penalización del inicio y del cierre de las ventanas temporales.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 6.2.2 Problemas de rutas con flotas heterogéneas y restricciones temporales blandas de servicio (VRPHESTW) .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.2.2.1 Propuesta de metaheurísticas híbridas en dos y tres fases .. **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.2.2.2 Influencia de un incremento de coste unitario por distancia .. **¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.2.2.3 Influencia de un incremento de las tarifas..... **¡Error! Marcador no definido.**
- 6.2.3 Problemas de rutas con flotas heterogéneas y múltiples usos con restricciones temporales blandas de servicio (VRPHEMSTW) ..**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.2.3.1 GRASP orientado en una heurística secuencial de construcción de rutas .....**¡Error! Marcador no definido.**
  - 6.2.3.2 Metaheurística de múltiples operadores y aceptación por umbrales. ....**¡Error! Marcador no definido.**

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

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 contemporece 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.

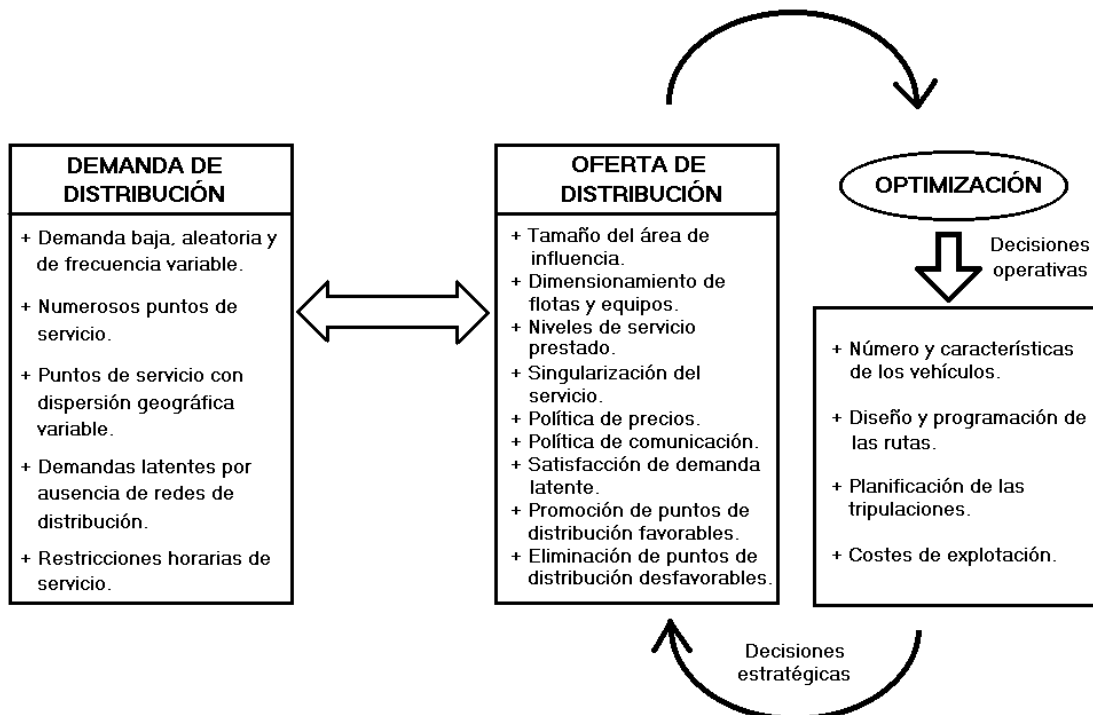
Así, las actividades que conforman la planificación operativa de la distribución física implican un gran número de pequeñas decisiones interrelacionadas entre sí. Además, la cifra de planes posibles crece exponencialmente con la dimensión del problema. Incluso para flotas pequeñas y con un número moderado 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



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.