



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## Tesis Doctoral

# ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS EFICIENTES EN LA LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN DE PAQUETERÍA

Autor:

**Miquel Àngel Estrada Romeu**  
*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

Director de la tesis:

**Prof. Francesc Robusté Antón**  
*Catedrático de Transporte de la UPC*

Programa de Doctorado de Ingeniería Civil  
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya

---

Barcelona, Octubre de 2007





Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS EFICIENTES EN LA LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN DE PAQUETERÍA**

**Miquel Àngel Estrada Romeu**

Memoria presentada para optar al título de Doctor  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
ETSECCPB-UPC

Director de la tesis: Dr. Francesc Robusté Antón

Barcelona, Octubre de 2007



*A Rosa Maria*



## ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS EFICIENTES EN LA LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN DE PAQUETERÍA

### RESUMEN

La tesis doctoral propone una nueva metodología de optimización del problema de diseño rutas de distribución de muchos orígenes a muchos destinos en paquetería. La optimización minimiza los costes de transporte del sistema y combina algoritmos heurísticos con el metaheurístico Búsqueda Tabú. Se han considerado tres estrategias para realizar el envío de un volumen de mercancía entre un origen y un destino [envío directo, paradas múltiples (*peddling*) y envío a través de una terminal de consolidación o almacén de *cross-docking* (*hub*)] adaptándose como restricciones a la capacidad de los vehículos, los plazos temporales para realizar en envío y el número de muelles de *cross-docking* en cada terminal.

El problema de optimización combinatoria se resuelve eficazmente mediante Búsqueda Tabú, consiguiendo una reducción del coste del sistema en relación a otros procedimientos heurísticos del 7% en problemas a carga completa (*Full Truck Load, FTL*) y superior al 12% en problemas a carga fraccionada (*Less than Truck Load, LTL*). A nivel heurístico, el criterio de parada y el criterio de reinicialización del procedimiento de búsqueda han condicionado en gran medida la bondad de la solución. Adicionalmente, se ha desarrollado una estrategia de aceptación de envíos de paradas múltiples (*peddling*) basada en criterios probabilísticos que conlleva una reducción media del 10% sobre el coste del sistema.

Aplicaciones a baterías de problemas, algunos de ellos basados en datos reales, certifican la bondad del modelo desarrollado. El modelo determina en cada caso el tamaño del vehículo más competitivo en costes en función de la carga media de los envíos (en volumen) y de los costes de transporte y de las paradas. Únicamente en casos puntuales las flotas de tamaño intermedio son competitivas en costes.

La determinación del número óptimo de *hubs* depende del tamaño medio de envío. El número de terminales *hub* para pocos puntos y envíos medios grandes ( $>30\text{m}^3$ ) es entre 1 y 2 y este número crece casi linealmente con el número de puntos. Para envíos más pequeños ( $<10\text{m}^3$ ) los crecimientos del número de *hubs* son más variables. Se presenta la formulación de una función estimativa de los costes totales del problema con unos errores de estimación inferiores al 16% de la solución propuesta por el algoritmo.

Finalmente, la congestión en la red de transporte afecta de forma relevante los costes de distribución del sistema. En la congestión de los muelles de *cross-docking* de las terminales, los costes son más importantes en escenarios de envíos a carga completa que en problemas *LTL*. En relación a la congestión en los arcos de la red, se constatan variaciones de costes poco relevantes para reducciones de velocidad acotadas. Finalmente, se sugieren extensiones de la investigación y del modelo desarrollado.





# AGRADECIMIENTOS

Ante la finalización de esta tesis y con ella, la conclusión de una etapa vital de más de 4 años, es el momento de recordar y agradecer a todas aquellas personas y organismos que han tenido un papel especial en el desarrollo de la misma.

En primer lugar, debo expresar mi más sincero agradecimiento al director de la tesis, el Profesor Francesc Robusté, quién me ha transmitido la ilusión por la investigación. Sus comentarios, sugerencias y motivación han sido esenciales durante esta etapa, al igual que su amistad y calidad humana.

A la Cátedra abertis, por la financiación parcial de la tesis.

Recordar también a todos los compañeros de realización del programa de doctorado, Carles, Cristian, Magín, Miller y Sergi, por hacer más llevadera “la mochila” y por todos los buenos momentos disfrutados.

Especialmente, a todos los amigos del CENIT por compartir la vorágine del día a día del Transporte con un gran compañerismo. A los que están,... y a los que han optado por otras alternativas profesionales.

También querría agradecer al Prof. Frederic Sabrià y Antonio Marín por la aportación de ideas y prácticas habituales de empresas de distribución de paquetería. Así mismo, a Josep Maria por su colaboración en el aspecto gráfico de esta tesis y a Sònia por la ayuda administrativa tan eficiente.

No debo olvidar el interés mostrado por mis amigos de las Grimm y mis familiares en este proyecto. “Ya se me acabaron las excusas”...

Y finalmente, a mis padres y especialmente a Rosa Maria por su apoyo incondicional a lo largo de este camino y ayudarme a mantener la ilusión en todo momento.

¡Muchas gracias a todos!

Barcelona, 26 de octubre de 2007



# ÍNDICE

	<u>Página</u>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
DESCRIPCIÓN DE LOS OBJETIVOS DE LA TESIS	4
ESTRUCTURA DE LA TESIS	5
<b>Capítulo 1.- REDES DE DISTRIBUCIÓN</b>	<b>7</b>
1.1. COSTES DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN	9
1.2. ESTRUCTURA DE UNA RED DE PAQUETERÍA INDUSTRIAL	11
1.3. TIPOLOGÍAS DE ESTRATEGIAS DE ENVÍO	18
1.3.1. Envíos directos	19
1.3.2. Paradas múltiples	21
1.3.3. Envíos a través de una terminal de consolidación. Comparativa con los envíos directos	24
<b>Capítulo 2.- ESTADO DEL ARTE</b>	<b>35</b>
2.1. APROXIMACIONES CONTÍNUAS	36
2.1.1. Problema operacional	37
2.1.2. Jerarquía de las terminales	39
2.1.3. Problema táctico y estratégico	42
2.1.4. Extensión a sistemas con varias terminales y dos transferencias	44
2.1.5. Generalizaciones. Situaciones alejadas de las hipótesis de partida	46
2.2. MODELOS BASADOS EN PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA Y ALGORITMOS HEURÍSTICOS ASOCIADOS	47
2.2.1. Programación matemática y heurísticos para la localización de terminales <i>hub</i>	50
2.2.2. Programación matemática para la localización de terminales <i>hub</i> y asignación de envíos a rutas	58
2.2.3. Extensión de los modelos de programación matemática	62
2.2.4. Algoritmos metaheurísticos para el problema de localización y asignación a rutas	64
2.2.5. Metodologías integradas de planificación de envíos en red troncal y red capilar	75

<b>Capítulo 3.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>79</b>
3.1. CONDICIONANTES Y ATRIBUTOS A CONSIDERAR EN LA ASIGNACIÓN DE FLUJOS EN LA RED TRONCAL	80
3.2. ASIGNACIÓN DE FLUJOS A LA RED COMO PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA	83
3.3. DESCOMPOSICIÓN DEL PROBLEMA	89
<b>Capítulo 4.- METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN</b>	<b>91</b>
4.1. ESTRUCTURA DE RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA	92
4.2. ENTRADA DE DATOS Y LOCALIZACIÓN DE TERMINALES HUB	94
4.3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA A CARGA COMPLETA (P1): FULL-TL	97
4.4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA (P2) CON ENVÍOS CON CARGA MENOR A LA CAPACIDAD	99
4.4.1. Algoritmo de resolución del problema (P2): LESS-TL	104
4.5. ALGORITMO METAHEURÍSTICO. BÚSQUEDA TABÚ	107
4.5.1. Búsqueda de la solución óptima en el vecindario del estado actual	108
4.5.2. Memoria a corto plazo	124
4.5.3. Memoria a largo plazo	126
4.5.4. Criterio de aspiración	127
4.6. IMPLANTACIÓN ÓPTIMA DE LA ESTRATEGIA DE ENVÍO <i>PEDDLING</i> EN RUTAS DE MUCHOS ORIGENES A MUCHOS DESTINOS	129
<b>Capítulo 5.- AJUSTE DE PARÁMETROS DE LA BÚSQUEDA TABU</b>	<b>137</b>
5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN BATERÍAS DE AJUSTE	138
5.1.1. Criterio de aceptación	140
5.1.2. Tiempo de computación	142
5.1.3. Parámetros $N_2$ y $N_3$	143
5.1.4. Parámetro <i>tabu tenure</i> ( $\theta$ )	146
5.2. ANÁLISIS DE LA IMPLANTACIÓN DE LA ESTRATEGIA <i>PEDDLING</i> EN ORIGEN Y DESTINO	147
5.3. COMPARATIVA DE RESULTADOS CON SOLUCIÓN ÓPTIMA	150
<b>Capítulo 6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>153</b>
6.1. GENERACIÓN DE BATERÍAS DE PROBLEMAS	154
6.2. ANÁLISIS DEL NÚMERO ÓPTIMO DE TERMINALES DE CONSOLIDACIÓN ( <i>HUBS</i> )	159
6.2.1. Inclusión de los costes de alquiler de las terminales en la formulación	160
6.2.2. Determinación del número óptimo de terminales <i>hub</i>	161
6.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COSTES UNITARIOS Y TAMAÑO ÓPTIMO DE LOS VEHÍCULOS	168
6.4. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE DISTRIBUCIÓN	177
<b>Capítulo 7.- ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CONGESTIÓN EN LOS COSTES DE TRANSPORTE</b>	<b>189</b>
7.1. CONGESTIÓN EN NODOS DE LA RED: INSTALACIONES	190
7.1.1. Generación de escenarios de análisis	190
7.1.2. Análisis de resultados en los escenarios de estudio	192
7.1.3. Tiempo y longitud de la cola de vehículos en una instalación	195
7.2. CONGESTIÓN EN ARCOS DE LA RED	203
7.2.1. Generación de escenarios de análisis	204
7.2.2. Análisis de resultados en los escenarios de estudio	205
<b>Capítulo 8.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA</b>	<b>209</b>

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

217

**ANEXOS**

Anexo A1.- Nomenclatura de variables utilizadas	A-1
Anexo A2.- Definición de la función analítica de la variable de estudio $A(r_c)$	A-5
Anexo A3.- Resultados obtenidos de la batería de calibración del algoritmo	A-9
Anexo A4.- Ajuste a una distribución Weibull de la repartición de cargas entre terminales	A-21
Anexo A5.- Resultados del análisis del número de terminales de consolidación óptimo ( $h^*$ ) para los problemas con distribución no uniforme	A-25
Anexo A6.- Resultados del análisis del tamaño de flota óptimo para los problemas de tamaño medio	A-31
Anexo A7.- Resultados del proceso de calibración de las funciones de estimación de coste	A-35

# ÍNDICE DE TABLAS

	<u>Página</u>
<b>Capítulo 2.- ESTADO DEL ARTE</b>	
Tabla 2.1. Resumen de las contribuciones científicas en la localización de hubs	48
Tabla 2.2. Resultados de aplicación del GA y GATS y solución exacta en problemas de localización de aeropuertos en EE.UU.	73
Tabla 2.3. Resultados de aplicación del GA y GATS y solución exacta en problemas de localización de aeropuertos en Canadá y Europa	73
<b>Capítulo 4.- METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN</b>	
Tabla 4.1. Datos de partida para el inicio de la metodología	94
<b>Capítulo 5.- AJUSTE DE PARÁMETROS DE LA BÚSQUEDA TABU</b>	
Tabla 5.1. Características de los problemas generados para la batería de ajuste de parámetros	139
Tabla 5.2. Resultados del estudio de la estrategia peddling en su aplicación a la primera batería de problemas	147
Tabla 5.3. Resultados del estudio de la estrategia peddling en su aplicación a un problema con 38 delegaciones variando los coeficientes de coste	149
Tabla 5.4. a) Matriz de envíos O-D en el problema P-B1, b) Matriz de envíos O-D en el problema PB-2 c) Matriz de envíos O-D en el problema PB-3	151
Tabla 5.5. Coeficientes de coste de parada y coste de transferencia adoptados en el problema PB-2	151
Tabla 5.6. Resultados obtenidos en la resolución de los problemas detallados en Barcos (2002)	152
<b>Capítulo 6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
Tabla 6.1. Resumen de costes unitarios utilizados en la generación de los problemas generales	157
Tabla 6.2. Resumen de costes unitarios utilizados en la generación de problemas de estudio de número óptimo de hubs y tamaño óptimo del vehículo	158
Tabla 6.3. Resumen de valores adoptados en la resolución de los problemas	162
Tabla 6.4. Resumen de valores adoptados en la batería de problemas para el análisis de sensibilidad	169
Tabla 6.5. Evolución de coste e incrementos de recursos asociados a las tipologías de vehículos	174
Tabla 6.6. Generación de baterías de problemas para la estimación de los costes de distribución de la carga considerando $C=80m^3$	178
Tabla 6.7. Soluciones para las baterías de problema con variación uniforme de carga considerando $C=80 m^3$	179
Tabla 6.8. Soluciones para las baterías con variación no uniforme de carga considerando $C=80m^3$	180
Tabla 6.9. Resultados de la estimación de los parámetros de la regresión	183

Tabla 6.10.	Resultados de la estimación de la distancia recorrida	183
Tabla 6.11.	Resultados de la estimación del número de envíos hub	184
Tabla 6.12.	Resultados de la estimación de costes totales de la batería de problemas con distribución de carga uniforme	186
Tabla 6.13.	Resultados de la estimación de costes totales de la batería de problemas con distribución de carga no uniforme	186
Tabla 6.14.	Resultados de las baterías de problemas utilizadas para validar la aplicación de las formulaciones estimativas	187

## **Capítulo 7.- EFECTO DE LA CONGESTIÓN EN LOS COSTES**

Tabla 7.1.	Caracterización de la batería de problemas para el estudio de los efectos de la congestión de terminales.	191
Tabla 7.2.	Porcentaje de utilización de los muelles de carga en los distintos escenarios del problema con $N_T=17$ delegaciones y $w_{ij} \in [0, 20] \text{ m}^3$	202
Tabla 7.3.	Porcentaje de utilización de los muelles de carga en los distintos escenarios del problema con $N_T=17$ delegaciones y $w_{ij} \in [0, 80] \text{ m}^3$	202
Tabla 7.4.	Tiempos y velocidades de congestión adoptados en los problemas generados	205
Tabla 7.5.	Detalle de escenarios y evaluación del coste total de transporte con la herramienta TS	206
Tabla 7.6.	Estimación del incremento del número de rutas y del incremento de coste en relación al Escenario 1.	207

# ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Página</u>
<b>Capítulo 1.- REDES DE DISTRIBUCIÓN</b>	
Fig. 1.1. Red de transporte de una empresa de paquetería industrial	12
Fig. 1.2. Coste de transporte en las distintas etapas de un envío (i,j)	12
Fig. 1.3. Esquema del sistema de distribución con terminales con rutas de distribución local y hubs. Fuente: Daganzo (2005)	13
Fig. 1.4. Esquema de operación de modelos basados en flujos de carga y modelos basados en viajes de vehículos. Fuente: Holguín (2007)	14
Fig. 1.5. a) Proceso de localización de instalaciones de servicio ( <i>facilities</i> ) con flujos fijos b) Proceso de localización de instalaciones teniendo en cuenta los orígenes y destinos de la mercancía a transportar	16
Fig. 1.6. Estrategias básicas cuya combinación permiten planificar un sistema de distribución	18
Fig. 1.7. Evolución del coste marginal en función del flujo en el arco	25
Fig. 1.8. Descomposición del problema analítico de envíos directos o envíos mediante una terminal de consolidación de M orígenes a N destinos.	26
Fig. 1.9. Decisión de envío directo o a través de terminal para todos los destinos	28
Fig. 1.10. Configuraciones mejoradas para un sistema <i>one-to-many</i> . Fuente: Elaboración propia a partir de Daganzo (1988)	32
<b>Capítulo 2.- ESTADO DEL ARTE</b>	
Fig. 2.1. Esquema del sistema de terminales con estructura estándar o jerarquizada en una dimensión. Fuente: Daganzo (2005)	38
Fig. 2.2. Esquema del sistema de terminales con estructura jerarquizada en dos dimensiones. Fuente: Daganzo (2005)	41
Fig. 2.3. Ejemplos de redes hub & spoke. a) Asignación simple de los nodos a un solo hub. b) Asignación múltiple de un nodo a más de 1 <i>hub</i>	63
Fig. 2.4. Función de coste por distancia no lineal y modelo HUBLOC. Fuente: O'Kelly et al.(1998)	64
Fig.2.5. Esquema de aplicación del algoritmo de aplicación del procedimiento propuesto en Wasner et al. (2004)	77
<b>Capítulo 4.- METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN</b>	
Fig. 4.1. Diagrama del proceso metodológico de solución de sistemas <i>many-to-many</i>	93
Fig. 4.2. Esquema de asignación de envío $a_{ij}^k$ a ruta $r$ por estrategia de envío directo al final de ruta existente	100
Fig. 4.3. Esquema de asignación de envío $a_{ij}^k$ a ruta $r$ por estrategia <i>peddling</i>	100



Fig. 4.4.	Esquema de asignación de envío $a_{ij}^{n_{ij}}$ por estrategia de envío <i>hub</i> a través de ruta $r$ y $s$ con transferencia en terminal $h_i$	102
Fig. 4.5.	Esquema de funcionamiento del movimiento M1	109
Fig. 4.6.	Esquema de funcionamiento del movimiento M2	111
Fig. 4.7.	Esquema de funcionamiento del movimiento M3	113
Fig. 4.8.	Esquema del funcionamiento del movimiento M3 con búsqueda de reducción de rutas	114
Fig. 4.9.	Esquema de funcionamiento del movimiento M4	116
Fig. 4.10.	Esquema de funcionamiento del movimiento M4 con mejora de reducción del número de rutas	117
Fig. 4.11.	Esquema de funcionamiento del movimiento M5	118
Fig. 4.12.	Diagrama de flujo del algoritmo de refinamiento de Búsqueda Tabú	128
Fig. 4.13.	Esquema de la ruta principal $(i,j)$ y posible inclusión de envío $(k,j)$ mediante estrategia <i>peddling</i> en origen	129
Fig. 4.14.	Lugar geométrico de los puntos de visita <i>peddling</i> en origen con igual sobrecoste de distancia	131
Fig. 4.15.	Detalle del círculo definido por el radio crítico $r_c$ que delimita la zona de inclusión del punto $k$ en envíos <i>peddling</i> en origen	134
Fig. 4.16.	Evolución del radio crítico $r_c^*$ en función del porcentaje de ocupación $\alpha$ del vehículo entre los puntos $i,j$	134
Fig. 4.17.	Lugar geométrico de los puntos de visita <i>peddling</i> en destino con igual sobrecoste de distancia	136

## Capítulo 5.- AJUSTE DE PARÁMETROS DE LA BÚSQUEDA TABU

Fig. 5.1.	a) Evolución del coste con el núm. de iteraciones del problema p3 para $N_1=500 N_T$ y $N_2=0,2N_T$	144
	b) Evolución del coste con el núm. de iteraciones del problema p3 para $N_1=500 N_T$ y $N_2=10 N_T$	145
	c) Evolución del coste con el núm de iteraciones del problema p4 para $N_1=500 N_T$ y $N_2=0,2 N_T$	145
	d) Evolución del coste con el núm. de iteraciones del problema p4 para $N_1=500 N_T$ y $N_2=10 N_T$	145
Fig.5.2.	a) Esquema de la red del problema PB-1	150
	b) Esquema de la red del problema PB-2	150
	c) Esquema de la red del problema PB-3	151

## Capítulo 6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fig.6.1.	Esquema del análisis de soluciones planteado	154
----------	--	-----

Fig.6.2.	a) Porcentaje de envíos a través de <i>hub</i> en el problema de 17 delegaciones	
	b) Porcentaje de envíos a través de <i>hub</i> en el problema de 38 delegaciones	164
Fig.6.3.	a) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 200$ €/día; $C_r^g = 200$ €/día para el problema de 17 delegaciones	166
	b) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 2000$ €/día; $C_r^g = 2000$ €/día para el problema de 17 delegaciones	166
	c) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 200$ €/día; $C_r^g = 2000$ €/día para el problema de 17 delegaciones	166
	d) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 700$ €/día; $C_r^g = 2000$ €/día para el problema de 17 delegaciones	166
Fig.6.4.	a) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 200$ €/día; $C_r^g = 200$ €/día para el problema de 38 delegaciones	167
	b) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 2000$ €/día; $C_r^g = 2000$ €/día para el problema de 38 delegaciones	167
	c) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 200$ €/día; $C_r^g = 2000$ €/día para el problema de 17 delegaciones	167
	d) Coste de transporte con $C_r^{\min} = 700$ €/día; $C_r^g = 2000$ €/día para el problema de 17 delegaciones	167
Fig. 6.5.	a) Costes totales para el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 20] m^3$	170
	b) Costes totales para el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 80] m^3$	171
	c) Costes totales para el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in [20, 40] m^3$	171
	d) Costes totales para el problema con 25 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 20] m^3$	171
	e) Costes totales para el problema con 25 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 80] m^3$	172
	f) Costes totales para el problema con 25 delegaciones y carga $w_{ij} \in [20, 40] m^3$	172
Fig. 6.6.	a) Coste total de distribución en problema con 17 delegaciones y $w_{ij} \in [0, 20] m^3$	173
	b) Coste total de distribución en problema con 25 delegaciones y $w_{ij} \in [0, 20] m^3$	174
Fig. 6.7.	a) Evolución del coste de distribución total en problema de 38 delegaciones con distribución de envíos uniforme y $w_{ij} \in [0, 20] m^3$	175
	b) Evolución del coste de distribución total en problema de 41 delegaciones con distribución de envíos Weibull y $w_{ij} \in [0, 20] m^3$	176
Fig. 6.8.	a) Distribución de la carga entre las 38 delegaciones del problema con distribución uniforme b) Distribución de la carga entre las 41 delegaciones del problema con distribución Weibull	177

---

Fig. 6.9.	Esquema de rutas con distinto número de arcos y valor de $\phi_{br}$ asociado	181
-----------	---	-----

## Capítulo 7.- EFECTO DE LA CONGESTIÓN EN LOS COSTES

Fig.7.1.	Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 20]m^3$	193
Fig.7.2.	Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 17 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 80]m^3$	193
Fig.7.3.	Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 38 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 20]m^3$	194
Fig. 7.4.	Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 38 delegaciones y carga $w_{ij} \in [0, 80]m^3$	194
Fig. 7.5.	Esquema de funcionamiento del proceso de colas en la instalación	196
Fig. 7.6.	Evolución de la demora total del sistema en función de la tasa de llegadas de vehículos a la instalación	200
Fig. 7.7.	Evolución de la demora total del sistema en función del coeficiente de variación del tiempo de servicio en la delegación cuando $m=3$ .	201
Fig. 7.8.	Definición de tramos con distintas velocidades en el trayecto entre delegaciones (i,j)	204
Fig. 7.9.	Evolución de los costes de transporte por efecto de la congestión	206

