

7. EFECTO DE LA CONGESTIÓN EN LOS COSTES

El objetivo de este capítulo se centra en la evaluación de los incrementos de coste de operación debidos a la saturación de las delegaciones por un dimensionamiento insuficiente de las instalaciones del sistema y por la congestión presente en los arcos y vías de comunicación de la red.

En un primer lugar, se analizarán los efectos de disponer un número limitado de muelles en las terminales y delegaciones de forma que condicione las entradas en la instalación para efectuar las operaciones de carga y descarga. La coordinación temporal de los envíos en redes de muchos orígenes y destinos en paquetería presenta fenómenos de hora punta en las instalaciones del sistema. Si los recursos humanos (personal para la carga o descarga) o físicos (número de muelles) no están dimensionados de forma correcta para el flujo de mercancía que gestiona la delegación o terminal, pueden producir la espera de vehículos e ineficiencias no deseadas. Se realizará un estudio analítico de las demoras producidas en las delegaciones aplicando la teoría de colas y la herramienta de resolución basada en el algoritmo de TS para evaluar los incrementos de coste del sistema.

Por otro lado, la disminución de la velocidad de recorrido en los accesos a las zonas industriales o entornos metropolitanos debido a la congestión genera una menor productividad de los vehículos. A nivel general de toda la red, este efecto obliga a disponer más vehículos de transporte para servir la misma demanda en comparación con

escenarios no congestionados. En este sentido, se propondrá una herramienta de valoración de los incrementos de coste en función de la reducción de velocidad en horas punta de máximo flujo viario, la duración del episodio de congestión y la longitud media de los accesos que presenten congestión.

7.1. CONGESTIÓN EN NODOS DE LA RED: INSTALACIONES

Una de las restricciones críticas en el diseño de las instalaciones es el número de muelles o puertas de cada terminal o delegación donde los vehículos estacionan para ser cargados o descargados. Debido a la gestión temporal coordinada del sistema y a los fenómenos de hora punta que describe la operativa de servicio, el dimensionamiento insuficiente de los muelles puede desencadenar la espera de los vehículos de carga en el exterior de la instalación y por lo tanto constituye una ineficiencia.

Si se considera el número de instalaciones, su tamaño y número de muelles como unos parámetros fijos del sistema, el diseño de rutas debería adoptar una configuración y estructuras de reparto adaptadas a los escenarios de congestión en terminales y delegaciones. El objetivo de la planificación de las rutas es minimizar las afectaciones al coste total por la saturación de las terminales y delegaciones incluyendo los tiempos muertos de espera y cumpliendo con las ventanas temporales del transporte. En este sentido, las herramientas de resolución pueden llevar a cabo una organización de las rutas que difiera de la solución óptima en escenarios no congestionados con la finalidad de visitar las instalaciones en periodos temporales de menor saturación. Se debe destacar que uno de los efectos más negativos de la saturación de las instalaciones es el incumplimiento de los plazos de entrega y política de servicio contratada con los clientes.

7.1.1. Generación de escenarios de análisis

El fenómeno de la congestión de las instalaciones se ha analizado por medio de la generación de una batería de problemas a la que se ha aplicado el algoritmo de resolución TS propuesto en el capítulo 5. Esta batería está compuesta por problemas de 17 y 38 delegaciones de transporte con envíos de tamaño reducido - $w_i \in [0,20] \text{ m}^3$ - y con carga significativa - $w_i \in [0,80] \text{ m}^3$ -. Se ha considerado que en los problemas de 17

delegaciones se pueden utilizar 2 terminales como hubs, mientras que en los problemas de 38 delegaciones este número se ha incrementado a 3.

Con el fin de minimizar las esperas de los vehículos y los efectos de la congestión, se ha introducido en la función objetivo del problema un coeficiente unitario de penalización por las demoras de los vehículos en las instalaciones. En la batería de problemas generada para este efecto, se ha asumido un valor del coeficiente c_w igual a 40 y 80 €/hora en demora y el valor nulo ($c_w=0$) para poder efectuar un análisis comparativo.

Por otro lado, se han generado un total de 9 escenarios de simulación de cada problema que consideran distintas situaciones de disponibilidad de muelles de carga en las instalaciones. Con todo, estos nueve escenarios se caracterizan por los atributos determinados en la Tabla 7.1.

La generación de los escenarios de modelización se ha escogido para cubrir un amplio espectro de periodos de congestión en instalaciones. En particular el escenario 1 representa una situación ideal sin efectos de saturación de instalaciones, que se utilizará como elemento de referencia para comparar el resto de resultados. El hecho de establecer un número de muelles igual a 30 es equivalente a considerar capacidad infinita de la delegación para el dominio de flujos de transporte de estudio. Un valor superior generaría desde el punto de vista operacional la creación de muelles que no se utilizarían y el incremento significativo del número de variables del modelo.

Tabla 7.1. Caracterización de la batería de problemas para el estudio de los efectos de la congestión de instalaciones

Escenarios simulados	Problemas		Comentarios
	# Muelles en hubs	# Muelles en otras delegaciones	
Escenario 1	30	30	Capacidad ilimitada
Escenario 2	2	30	Capacidad parcialmente limitada en hubs
Escenario 3	3	30	
Escenario 4	4	30	
Escenario 5	2	2	Capacidad limitada en todas las delegaciones
Escenario 6	3	3	
Escenario 7	4	4	
Escenario 8	Variable	Delegaciones impares: 4 muelles, delegaciones pares: 2 muelles ^{*1}	
Escenario 9	5	5	

*1: En el caso de problemas de 38 delegaciones con volumen de carga $w_{ij} \in [0, 80] \text{ m}^3$, el número de muelles en delegaciones pares ha sido de 3.

El resto de escenarios se articula en dos grupos diferenciados. En un primer plano, se generan los escenarios 2-4 que representan situaciones con limitación de recursos exclusivamente en las terminales hub. En estos casos, el número de muelles en delegaciones estándar (no hub) se ha considerado igual a 30 para asegurar que no se producen situaciones de congestión, si bien en una aplicación real deberían tener una capacidad inferior a las terminales hub. En un segundo plano, se ha generado un grupo de escenarios (5-9) que presentan limitaciones de muelles en todas las delegaciones de la región de servicio.

7.1.2. Análisis de resultados en los escenarios de estudio

Los distintos escenarios de estudio han sido modelizados con la aplicación del algoritmo TS con un criterio de parada y de reinicialización determinado por $N_1=4000N_T$, $N_2=N_3=0,2N_T$, y el parámetro *tabu tenure* $\theta=100$. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 7.1, 7.2 para el problema de 17 delegaciones y en las Figuras 7.3. y 7.4 para el problema con 38 delegaciones.

El escenario 1 es el que representa un dimensionamiento holgado para la demanda a servir y por lo tanto es el que menor coste de distribución presenta en todos los escenarios. Los escenarios 2, 3 y 4 reflejan condiciones de congestión exclusivamente en las terminales que actúan como hub. Se puede comprobar como el Escenario 2 (más restrictivo) presenta unos incrementos de coste en relación a la situación sin congestión del 2% en los problemas con 17 delegaciones, 3% en el problema de 38 delegaciones con $w_i \in [0, 80] \text{ m}^3$ y 7,5% con 38 delegaciones con $w_i \in [0, 20] \text{ m}^3$. El paso hacia escenarios con unas restricciones menos acusadas (3 y 4) se produce con un descenso del coste de distribución. En este sentido, el Escenario 4 presenta valores de coste muy similares al Escenario 1 en los problemas de 17 delegaciones, si bien en los problemas de 38 delegaciones presenta unos incrementos del orden del 2% en relación a E-1.

Cuando se analizan los escenarios correspondientes a la baja disponibilidad de muelles en todas las delegaciones del sistema, se puede comprobar que el Escenario 5 es el que presenta unos mayores costes de transporte, un 7-8% superiores al escenario sin restricciones (E-1) a excepción de los problemas con 38 delegaciones y $w_i \in [0, 80] \text{ m}^3$, en el que el incremento medio es de 2%. También es destacable por su importancia de costes el Escenario 8 con unos incrementos medios del 3-5%.

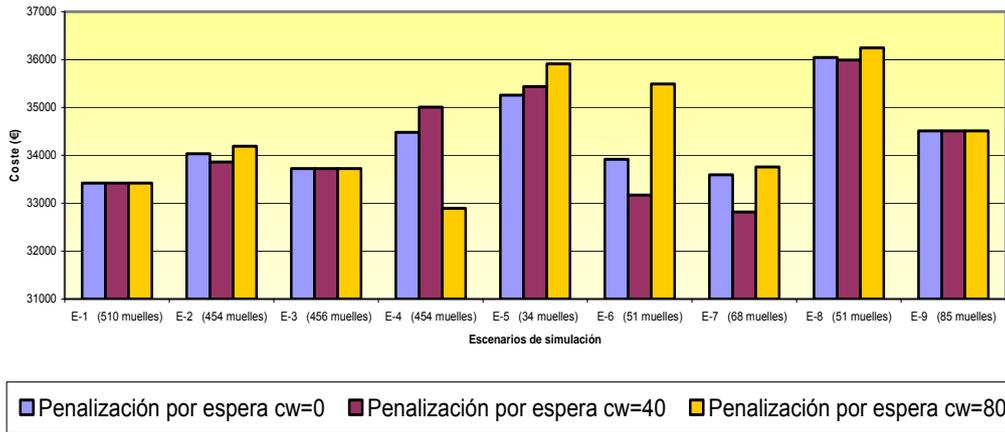


Fig.7.1. Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 17 delegaciones y carga $w_i \in [0, 20] m^3$

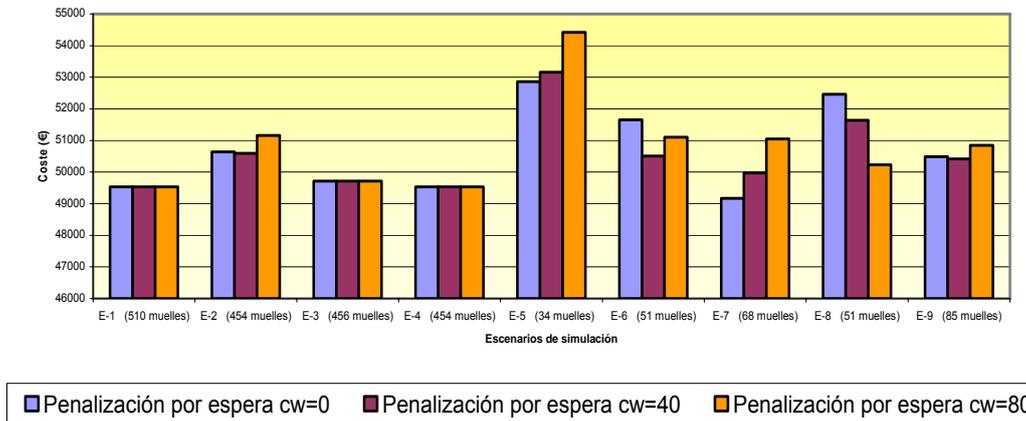


Fig.7.2. Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 17 delegaciones y carga $w_i \in [0, 80] m^3$

Sin embargo, se debe tener presente que el incremento de coste de los escenarios con congestión no es exclusivamente atribuible al coste del tiempo muerto de espera, es decir al producto del tiempo de demora por el coeficiente de coste unitario c_w . El hecho de tener que realizar una parada en una delegación que implique una demora conlleva la pérdida de productividad de los vehículos, pudiendo ocasionar un incremento de la flota óptima (sin congestión). A la vez, si esto sucede, el comportamiento del algoritmo también influye, al modificar las rutas óptimas para evitar llegar a las instalaciones con congestión en los períodos de máxima demanda.

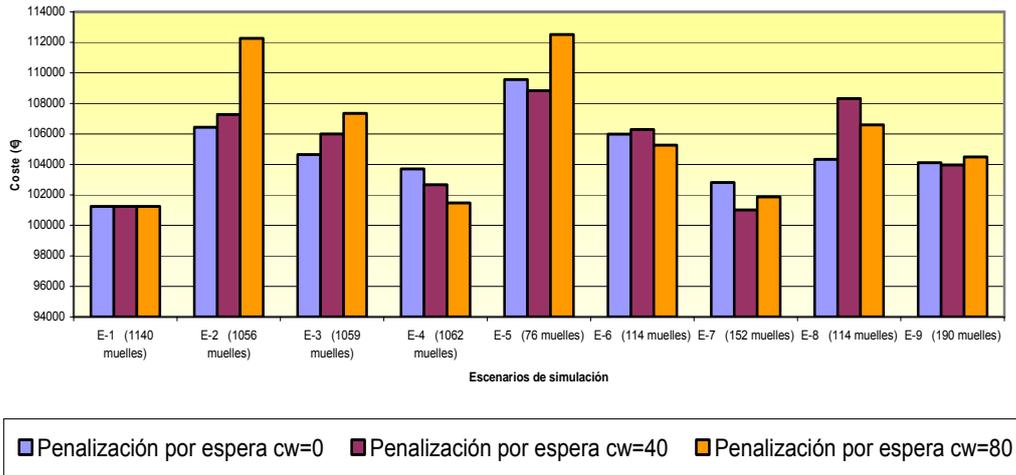


Fig.7.3. Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 38 delegaciones y carga $w_i \in [0, 20] m^3$

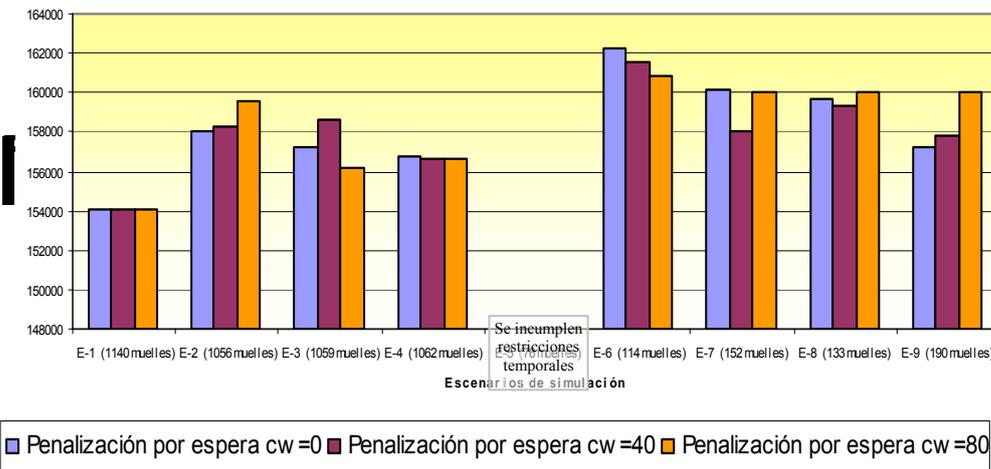


Fig.7.4. Costes de distribución en situaciones de saturación en el problema con 38 delegaciones y carga $w_i \in [0, 80] m^3$

La introducción de distintos valores del coeficiente de coste o penalización por demora (c_w) únicamente ha producido un incremento del coste total del sistema en los escenarios que presentan más congestión (escenario 2, 5 y en algunos casos en el escenario 8). Sin embargo, en los demás escenarios la mejor solución obtenida es realizada indistintamente con la adopción de $c_w=40$ y 80 €/h. Este efecto se puede explicar por el hecho que pequeñas demoras en alguna instalación hagan explorar un nuevo dominio de soluciones mejores a las anteriores en función del incremento de coste de la iteración, es decir, en función de c_w .

Se debe destacar que en los problemas con volumen de carga $w_i \in [0, 80]$ m³ se presentan resultados mucho más homogéneos que los problemas con volúmenes de envío altamente inferiores a la capacidad, con $w_i \in [0, 20]$ m³ y 38 delegaciones. En los primeros, la máxima variación es de 8200 € (5% del coste total) mientras que en los problemas con envíos de tamaño reducido la máxima variación es de 11500 € (11,4% del coste total).

Cabe mencionar que el problema con 38 delegaciones con volúmenes de carga $w_i \in [0, 80]$ m³ no ha podido ser resuelto bajo las condiciones propuestas en el escenario 5. Esto es debido a que el número de muelles disponibles en una instalación es insuficiente para realizar el envío o recepción de mercancía en el periodo o plazo de estudio fijado. Este hecho también ha obligado a modificar las condiciones del escenario 8 para esta tipología de problemas, ya que si el número de muelles para las delegaciones pares fuese igual a 2 no se podría solucionar si sobrepasar los límites de la jornada laboral.

7.1.3. Tiempo y longitud de la cola de vehículos en una instalación

La evaluación de los efectos de la congestión en las instalaciones de la red de transporte debido a la limitación del número de muelles en cada delegación constituye un problema de redes de colas.

Cada ruta $r \in R$ visita cada delegación n_i $i=1, \dots, N_T$ en la que se consume un tiempo t_i en función de la mercancía en origen, en destino o en tránsito de la instalación. Debido a la variabilidad de la secuencia de visita entre las delegaciones, el estudio del sistema de distribución como un problema de redes de colas resulta complejo.

Sin embargo, los efectos de la limitación de recursos (muelles) se pueden analizar considerando una sola delegación en lugar de abordarlos desde la perspectiva de toda la red de distribución mediante la teoría de colas.

En este sentido, se plantea un modelo de colas con unos vehículos (clientes) que requieren un servicio (carga o descarga de mercancía) en función del tiempo generados en una *fuentes de entrada*. Estos vehículos entran en el sistema y se unen a una cola. El tamaño de la población potencial de vehículos o clientes es finito (flota de vehículos) aunque una ruta o vehículo puede visitar más de una vez una delegación en un mismo tiempo de ciclo o jornada laboral.

La cola es el lugar donde los vehículos esperan antes de ser servidos y en este caso se ha supuesto que no existe ningún tipo de limitación en su longitud máxima (cola infinita). La disciplina de cola es FCFS (primero en llegar, primero en ser servido), por lo que no existe ningún tipo de prioridad en el servicio.

El mecanismo de servicio de la delegación se basa en m muelles de carga o servidores dispuestos en paralelo. De este modo, el vehículo presente en la primera posición de la cola entra al primer servidor o muelle libre para que se le presten los servicios de carga o descarga que éste precise. El tiempo que transcurre entre que el vehículo entra y sale del muelle se denomina tiempo de servicio.

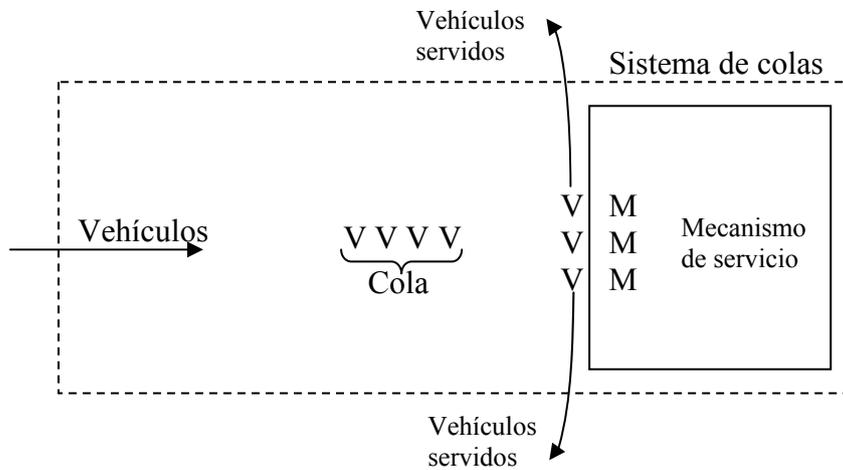


Fig. 7.5. Esquema de funcionamiento del proceso de colas en la instalación

La planificación operativa de las rutas mediante la aplicación del programa permite determinar los horarios de llegada de cada vehículo a la instalación y el tiempo de servicio. Sin embargo, en la fase de planificación estratégica (previa a la operativa) cuando se determina el número de muelles para operar, se desconocen los tiempos o tasas de llegadas y los tiempos o tasas de servicio. Por este motivo, es preciso aproximar estas variables por medio de distribuciones probabilísticas que permitan caracterizar la ocupación de los muelles, los tiempos de espera y la longitud de la cola asociada a una cierta probabilidad de ocurrencia.

El análisis estocástico de la teoría de colas debe suponer una distribución probabilística sobre las tasas de servicio y las tasas de llegadas de los vehículos, o de forma equivalente una distribución de los tiempos de servicio y de los tiempos entre las llegadas consecutivas de vehículos.

Un sistema de colas elemental puede ser descrito por el proceso de llegadas caracterizado por la secuencia de las variables aleatorias de los tiempos de llegada $\{A_1, \dots, A_s\}$. Es muy común que la secuencia de tiempos de llegada sea independiente e idénticamente distribuida, permitiendo que el proceso de llegada pueda ser considerado como un proceso de nacimiento y muerte (cadenas de Markov). El tiempo medio de llegada se denota por $E(A) = \bar{t}_a$ y su expresión recíproca es la tasa de llegadas λ de los vehículos al sistema, expresada en la ecuación (7.1).

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}_a} \quad (7.1)$$

La secuencia $\{B_1, B_2, \dots, B_s\}$ de tiempos de servicio de las distintas tareas, clientes o vehículos debe ser evaluada por medio de un conjunto de variables aleatorias independientes con una función de distribución común. El tiempo medio de servicio se denota por $E(B) = \bar{t}_s$ y su expresión recíproca se conoce por la tasa de servicio μ determinada según la expresión (7.2).

$$\mu = \frac{1}{\bar{t}_s} \quad (7.2)$$

El modelo más común y de mayor aplicación en la teoría de colas con m servidores es el $M/M/m$, en el que se supone que los tiempos de servicio siguen una distribución exponencial negativa al igual que los tiempos entre llegadas de vehículos (llegadas Poisson), con la presencia de m servidores o muelles. Esta hipótesis implica que las llegadas al sistema ocurren de manera aleatoria pero con una tasa media fija y sin importar cuantos clientes están ya en el sistema.

En el caso que nos ocupa, al ser la población potencial finita, no se cumplen las hipótesis de aplicación del modelo $M/M/m$ en relación a la distribución de los tiempos de llegada. A la vez, los tiempos de servicio se han supuesto directamente proporcionales al volumen de mercancía a cargar o descargar. Teniendo en cuenta que los volúmenes a transportar entre delegaciones O-D siguen una distribución uniforme (a,b) , se puede argumentar que la distribución de los tiempos de servicio no seguirá una distribución exponencial.

De este modo, se asume que el sistema de colas puede asimilarse a un sistema $GI/G/m$, donde el proceso de llegadas y el proceso de servicio siguen una distribución genérica (si bien las llegadas son independientes entre sí) y existen m muelles para servir los camiones.

El hecho de suponer una distribución de llegadas y tiempos de servicio genérica únicamente implica la consideración del tiempo medio entre llegadas y entre salidas ($1/\lambda$ y $1/m\lambda$ respectivamente) y las varianzas σ_{ta}^2 , σ_{ts}^2 de estas distribuciones.

Para proceder al cálculo de las variables representativas del sistema de colas $GI/G/m$ únicamente se disponen de formulaciones aproximadas (extensiones de los modelos $M/G/m$ o $GI/G/1$) y de cotas superiores-inferiores de las variables. En particular, en Hillier y Lieberman (2001) se establece que el tiempo total de permanencia en el sistema, W_t , está acotado por las expresiones (7.3) y (7.4),

$$W_t \leq \frac{\sigma_{ta}^2 + \frac{\sigma_{ts}^2}{m} + \frac{m-1}{m^2 \mu^2}}{2(1-\rho)} \lambda \quad (7.3)$$

$$W_t \geq \frac{\rho^2 c_{v,ts}^2 - \rho(2-\rho)}{2\lambda(1-\rho)} - \frac{m-1}{m} \frac{(c_{v,ts}^2 + 1)}{2\mu} \quad (7.4)$$

donde la variable $\rho = \frac{\lambda}{m\mu}$ representa el porcentaje de utilización de los muelles y

$c_{v,ts}^2 = \frac{\sigma_{ts}^2}{\frac{t_s^2}{2}}$ es el coeficiente de variación de los tiempos de servicio.

Sin embargo, la formulación aproximada más conocida en los sistemas $GI/G/m$ que evalúa el tiempo de demora de todos los vehículos es la ecuación de Allen-Cunneen, determinada en la expresión (7.5), donde P_m es la probabilidad de que un vehículo tenga que esperar por estar todos los servidores ocupados.

$$W_t \approx \frac{P_m / \mu (c_{v,ta}^2 + c_{v,ts}^2)}{1-\rho} \frac{1}{2m} \quad (7.5)$$

La probabilidad P_m se puede calcular por medio de la ecuación (7.6).

$$P_m = P(K \geq m) = \frac{(m\rho)^m}{m!(1-\rho)} \pi_o \quad (7.6)$$

$$\text{donde } \pi_o = \left[\sum_{k=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^k}{k!} + \frac{(m\rho)^m}{m!} \frac{1}{1-\rho} \right]^{-1}$$

La aproximación propuesta por Allen-Cunneen ha sido posteriormente mejorada por Kramer/Langenbach-Belz con el uso del factor corrector G_{KLB} según la expresión (7.7),

$$W_t \approx \frac{P_m / \mu (c_{v,ta}^2 + c_{v,ts}^2)}{1-\rho} \frac{1}{2m} G_{KLB} \quad (7.7)$$

donde la determinación del factor de corrección G_{KLB} se detalla en la expresión (7.8).

$$G_{KLB} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{2}{3} \frac{1-\rho}{P_m} \frac{(1-c_{v,ta}^2)^2}{c_{v,ta}^2 + c_{v,ts}^2}\right) & 0 \leq c_{v,ta} \leq 1 \\ \exp\left(-\frac{1-\rho}{1} \frac{c_{v,ta}^2 - 1}{c_{v,ta}^2 + 4c_{v,ts}^2}\right) & c_{v,ta} \geq 1 \end{cases} \quad (7.8)$$

Por medio de la ecuación de Little (expresión 7.9) se puede relacionar las expresiones anteriores de la demora total del sistema W_t y del número de vehículos en el sistema L a través de la tasa de llegadas promedio durante el periodo de cola $\bar{\lambda}$.

$$L = \lambda W \quad (7.9)$$

En este punto, se han utilizado las expresiones (7.1) - (7.9) para poder caracterizar el proceso de colas de una instalación y así poder dimensionar un número de recursos ajustado a los requerimientos de la demanda con un tiempo total de espera W acotado.

El conjunto de formulaciones han permitido cuantificar de forma teórica los tiempos de espera en los distintos escenarios de modelización de este capítulo con un valor característico del número de muelles. En la Figura 7.6. se evalúa la demora total en el sistema para distintas tasas de llegada, con una variancia del tiempo de servicio $\sigma_{ts}^2=0,25$ horas² y del intervalo de llegadas de vehículos $\sigma_{ta}^2=0,5$ horas². Se puede comprobar que cada escenario con un número m de muelles fijo, $m=\{2,3,4,5\}$, presenta

una tasa de llegadas máxima a partir de la cual los tiempos de espera crecen exponencialmente cuando el factor de utilización $\rho > 0,95$. De este modo, los valores de la tasa de llegadas máximos asociados a un factor de utilización del 0,9666 son $\lambda(m=2)=5,79$; $\lambda(m=3)=8,70$; $\lambda(m=4)=11,6$; y $\lambda(m=5)=14,7$ (llegadas/hora).

Evaluación de la demora total en función de la utilización de los servidores

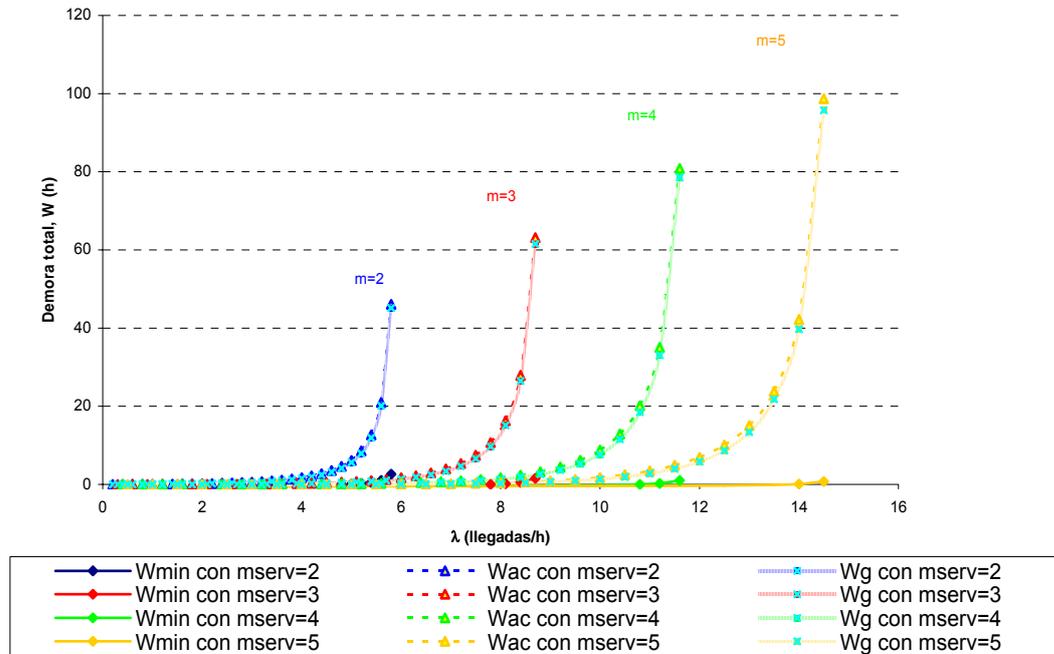


Fig. 7.6. Evolución de la demora total del sistema en función de la tasa de llegadas de vehículos a la instalación

Sin embargo, la Figura 7.6. supone una variación de las variables del sistema referentes a las llegadas y salidas caracterizadas por las varianzas $\sigma_{is}^2, \sigma_{ia}^2$ fijas. En la Figura 7.7. se analiza la sensibilidad de la demora total del sistema a cambios en la caracterización de la variación de las operaciones de servicio. En particular, este análisis de sensibilidad se ha efectuado en base al coeficiente de variación de los tiempos de servicio con un número de muelles $m=3$. Cabe destacar que una de las causas que originan una variación en los tiempos de servicio es la variación del volumen de carga entre los envíos. Sistemas con una carga de envíos $w_i \in [0, 20] \text{ m}^3$ presentarán un coeficiente de variación mucho más reducido que envíos con carga $w_i \in [0, 80] \text{ m}^3$ y por lo tanto, los primeros generarían una demora total menor para un mismo valor del factor de utilización ρ .

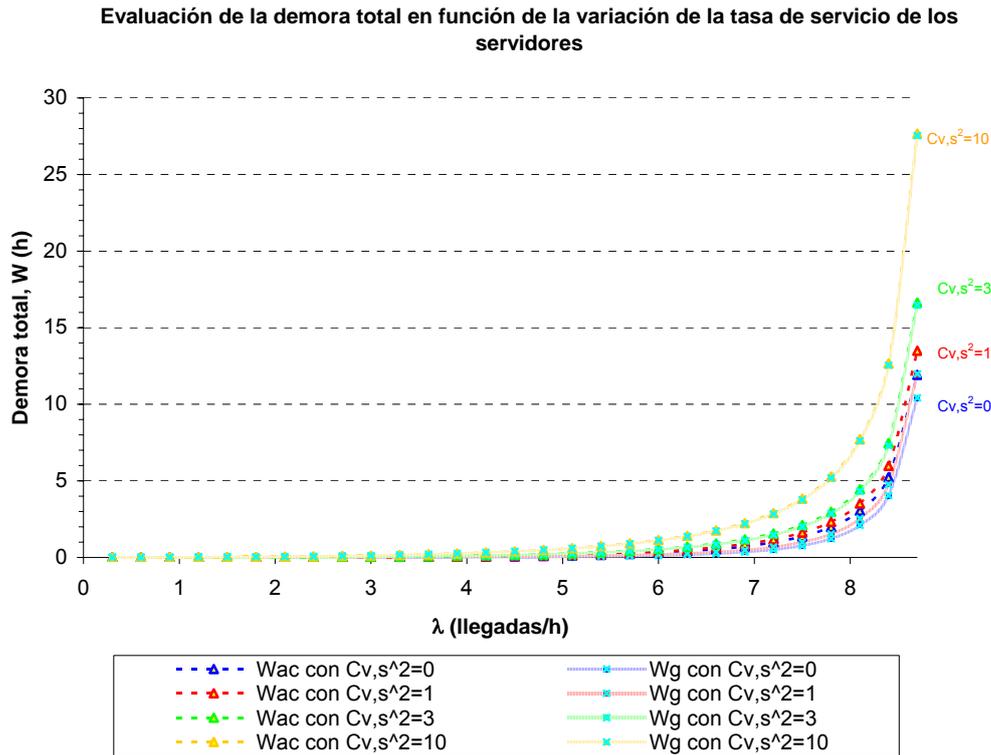


Fig. 7.7. Evolución de la demora total del sistema en función del coeficiente de variación del tiempo de servicio en la delegación cuando $m=3$.

Es interesante evaluar la variación de los tiempos de servicio en función de la tipología de problema considerada. En las Tablas 7.2 y 7.3 se comparan los porcentajes teóricos de utilización de los muelles para el caso de 17 delegaciones con variación del volumen de carga $w_{ij} \in [0, 20] \text{ m}^3$ y $w_{ij} \in [0, 80] \text{ m}^3$ respectivamente sin considerar las paradas en transferencia (terminales hub).

En la segunda columna de las Tablas 7.2 y 7.3 se ha evaluado el tiempo de servicio en la delegación para efectuar las operaciones de carga y descarga de todos los flujos con origen y destino en la delegación. Estos valores son independientes de las rutas efectuadas y por lo tanto se pueden estimar a priori. Se puede comprobar que estos tiempos de servicio difieren significativamente entre los dos problemas, de modo que se obtienen porcentajes de utilización de los muelles de carga con variaciones importantes. Con la consideración de estos porcentajes y la construcción de un diagrama *ad hoc* como el representado en la Figura 7.6 para el problema en cuestión, se podría evaluar de forma particular las demoras esperadas y consecuentemente las ineficiencias del sistema en cuestión.

Tabla 7.2. Porcentaje de utilización de los muelles de carga en los distintos escenarios del problema con $N_T= 17$ delegaciones y $w_i \in [0, 20] m^3$

Terminal	Tiempo carga y descarga (h)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		30 muelles	2-30 muelles	3-30 muelles	4-30 muelles	2 muelles	3 muelles	4 muelles	4-2 muelles	5 muelles
1	2,13	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,1183	0,0789	0,0592	0,0592	0,0473
2 (hub)	1,8	0,0067	0,1000	0,0667	0,0500	0,1000	0,0667	0,0500	0,1000	0,0400
3	1,57	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0872	0,0581	0,0436	0,0436	0,0349
4	1,93	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,1072	0,0715	0,0536	0,1072	0,0429
5	2,575	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,1431	0,0954	0,0715	0,0715	0,0572
6	2,41	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,1339	0,0893	0,0669	0,1339	0,0536
7	1,835	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068	0,1019	0,0680	0,0510	0,0510	0,0408
8	1,99	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,1106	0,0737	0,0553	0,1106	0,0442
9	2,27	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084	0,1261	0,0841	0,0631	0,0631	0,0504
10	1,975	0,0073	0,0073	0,0073	0,0073	0,1097	0,0731	0,0549	0,1097	0,0439
11	1,69	0,0063	0,0063	0,0063	0,0063	0,0939	0,0626	0,0469	0,0469	0,0376
12	1,82	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,1011	0,0674	0,0506	0,1011	0,0404
13	1,915	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,1064	0,0709	0,0532	0,0532	0,0426
14	2,1	0,0078	0,0078	0,0078	0,0078	0,1167	0,0778	0,0583	0,1167	0,0467
15	2,175	0,0081	0,0081	0,0081	0,0081	0,1208	0,0806	0,0604	0,0604	0,0483
16 (hub)	2,015	0,0075	0,1119	0,0746	0,0560	0,1119	0,0746	0,0560	0,1119	0,0448
17	2,015	0,0075	0,0075	0,0075	0,0075	0,1119	0,0746	0,0560	0,0560	0,0448
Promedio (h)		0,0075	0,0191	0,0149	0,0129	0,1118	0,0745	0,0559	0,0821	0,0447
Desviación estándar (h)		0,0009	0,0328	0,0210	0,0152	0,0140	0,0094	0,0070	0,0299	0,0056

Tabla 7.3. Porcentaje de utilización de los muelles de carga en los distintos escenarios del problema con $N_T= 17$ delegaciones y $w_i \in [0, 80] m^3$

Terminal	Tiempo carga y descarga (h)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
		30 muelles	2-30 muelles	3-30 muelles	4-30 muelles	2 muelles	3 muelles	4 muelles	4-2 muelles	5 muelles
1	8,425	0,0312	0,0312	0,0312	0,0312	0,4681	0,3120	0,2340	0,2340	0,1872
2 (hub)	6,485	0,0240	0,3603	0,2402	0,1801	0,3603	0,2402	0,1801	0,3603	0,1441
3	8,465	0,0314	0,0314	0,0314	0,0314	0,4703	0,3135	0,2351	0,2351	0,1881
4	6,02	0,0223	0,0223	0,0223	0,0223	0,3344	0,2230	0,1672	0,3344	0,1338
5	7,77	0,0288	0,0288	0,0288	0,0288	0,4317	0,2878	0,2158	0,2158	0,1727
6	7,395	0,0274	0,0274	0,0274	0,0274	0,4108	0,2739	0,2054	0,4108	0,1643
7	7,41	0,0274	0,0274	0,0274	0,0274	0,4117	0,2744	0,2058	0,2058	0,1647
8 (hub)	8,515	0,0315	0,4731	0,3154	0,2365	0,4731	0,3154	0,2365	0,4731	0,1892
9	6,39	0,0237	0,0237	0,0237	0,0237	0,3550	0,2367	0,1775	0,1775	0,1420
10	6,7	0,0248	0,0248	0,0248	0,0248	0,3722	0,2481	0,1861	0,3722	0,1489
11	8,89	0,0329	0,0329	0,0329	0,0329	0,4939	0,3293	0,2469	0,2469	0,1976
12	7,67	0,0284	0,0284	0,0284	0,0284	0,4261	0,2841	0,2131	0,4261	0,1704
13	7,44	0,0276	0,0276	0,0276	0,0276	0,4133	0,2756	0,2067	0,2067	0,1653
14	7,74	0,0287	0,0287	0,0287	0,0287	0,4300	0,2867	0,2150	0,4300	0,1720
15	7,445	0,0276	0,0276	0,0276	0,0276	0,4136	0,2757	0,2068	0,2068	0,1654
16	9,625	0,0356	0,0356	0,0356	0,0356	0,5347	0,3565	0,2674	0,5347	0,2139
17	6,945	0,0257	0,0257	0,0257	0,0257	0,3858	0,2572	0,1929	0,1929	0,1543
Promedio (h)		0,0282	0,0739	0,0576	0,0494	0,4226	0,2818	0,2113	0,3096	0,1691
Desviación estándar (h)		0,0035	0,1306	0,0840	0,0607	0,0532	0,0354	0,0266	0,1145	0,0213

7.2. CONGESTIÓN EN ARCOS DE LA RED

El desarrollo de este análisis se ha efectuado considerando que la velocidad de circulación de los vehículos de transporte de larga distancia (*line-haul*) es constante en los arcos del sistema a excepción de las zonas más próximas a las instalaciones (nodos), donde existe el fenómeno de la congestión. En este sentido, se ha supuesto que el fenómeno de congestión se localiza en una zona circular de radio $d_{c,i}$ concéntrica en cada delegación $i \in N$. Los vehículos que efectúan el transporte con origen a la delegación i se desplazan a una velocidad $v_{s,i}$ en todos los tramos de los arcos incluidos en esta zona. Como el fenómeno de la congestión es variable en distintos episodios temporales, la velocidad de salida de la delegación se ha considerado como una función del tiempo de realización de los envíos, $v_{s,i}(t)$. Adicionalmente, se considera que todos los desplazamientos de los vehículos con destino a la delegación i se realizan a una velocidad $v_{e,i}(t)$.

De este modo, cualquier ruta que presente un desplazamiento entre dos delegaciones $i, j \in N$, recorrerá un primer tramo de longitud $d_{c,i}$ a una velocidad $v_{s,i}(t)$, posteriormente la parte intermedia del arco de longitud $(D_{ij} - d_{c,i} - d_{c,j})$ a velocidad normal v y el tramo final de acceso a la delegación de destino (longitud $d_{c,j}$) a velocidad $v_{e,i}(t)$. El esquema de operación queda detallado en la Figura 7.8, donde se reproduce la trayectoria del vehículo de transporte en las distintas etapas de distinta velocidad.

El efecto principal de la reducción de velocidad en los entornos a las instalaciones es el incremento del tiempo medio de trayecto de un envío entre las delegaciones (i, j) y consecuentemente el incremento del número de rutas de transporte. Para realizar un estudio analítico del incremento de rutas y costes se retoma la ecuación (6.7) en la que se evaluaba el tiempo medio \bar{B} para efectuar el trayecto entre dos instalaciones, donde se suponía una velocidad v constante en todo el recorrido.

En este caso, el hecho de considerar escenarios de congestión en distintas franjas horarias obliga a reformular la ecuación (6.7) integrando la sección de longitud $d_{c,i}$ a velocidad $v_{s,i}(t)$, la sección de longitud $d_{c,j}$ a velocidad $v_{e,i}(t)$ y la extensión temporal de los periodos de congestión en los que se producen.

Si se analiza un territorio de servicio que presente una gestión temporal de los envíos marcada por el mismo huso horario (por ejemplo el caso Español) se puede suponer que los fenómenos de hora punta ocurren en las vías próximas de todas las delegaciones en las mismas franjas temporales. En este contexto, si se identifican un total de Φ episodios temporales a lo largo del periodo de transporte P_f con velocidades uniformes

en $d_{c,j}$ y una duración de $t_{c,k}$ ($k=1, \dots, \Phi$), la ecuación (6.7) puede substituirse por la ecuación (7.10) para tener en cuenta los fenómenos de congestión.

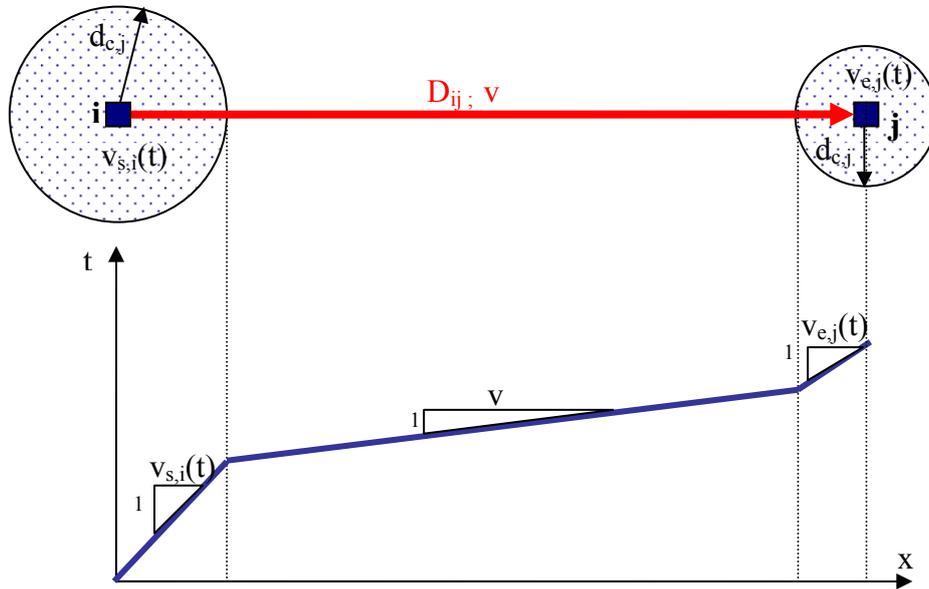


Fig. 7.8. Definición de tramos con distintas velocidades en el trayecto entre delegaciones (i,j).

$$\bar{B} = \frac{\left((h_{2,\max} - h_{1,\max}) - \sum_{k=1}^{\Phi} t_{c,k} \right)}{\left(\frac{\bar{d}}{v} + \bar{l}_b + \bar{u}_b \right)} + \sum_{k=1}^{\Phi} \left\{ \frac{t_{c,k}}{\left(\frac{\bar{d} - 2\bar{d}_c}{v} + \frac{\bar{d}_c}{v_e(k)} + \frac{\bar{d}_c}{v_s(k)} + \bar{l}_b + \bar{u}_b \right)} \right\} \quad (7.10)$$

La determinación del tiempo medio de un envío \bar{B} entre delegaciones en todo el periodo de operación Pf se utilizará para calcular el nuevo número de rutas $\tilde{N}_r(\bar{B})$ por medio de la expresión (6.9). Cabe decir que los valores medios de velocidad de entrada $\bar{v}_e(k)$, velocidad de salida $\bar{v}_s(k)$ y del radio de circunferencia \bar{d}_c se deberían promediar por el flujo o envíos asociados a cada delegación.

7.2.1. Generación de escenarios de análisis

Para proceder al estudio de los costes de transporte en entornos con arcos congestionados se ha utilizado un problema de $N_T=45$ delegaciones (6 de ellas con funciones de hub), con distribución no uniforme de carga entre delegaciones y

$w_{ij} \in [0, 20] \text{ m}^3$. El plazo temporal para efectuar las rutas de distribución se ha considerado de 10 horas. Adicionalmente, se han desarrollado distintos escenarios de análisis en congestión, en los que se ha considerado que todas las delegaciones sufrían periodos de congestión uniformes. En este sentido, todas las delegaciones comparten las mismas velocidades de entrada $v_{e,i}(t)$ y salida $v_{s,i}(t)$ y la duración temporal de los periodos de congestión. Para simplificar la ejecución del proceso, se han supuesto 2 periodos de congestión idénticos de duración $t_c/2$ en un mismo periodo de reparto P_f , donde el primero reproduce la hora punta de la tarde ($h_{1,max} < t < t_c/2$) y el segundo la hora punta de la mañana ($h_{2,max} - t_c/2 < t < h_{2,max}$). En cada periodo de congestión de cada escenario, la velocidad de entrada y salida de la instalación se ha considerado constante.

El total de 16 escenarios considerados es una combinación de los tiempos de congestión de cada periodo y de las velocidades detalladas en la Tabla 7.4. En todos los escenarios se ha considerado un mismo radio de la zona de congestión, $d_c = 15\text{km}$ para todo el periodo de distribución. Se debe mencionar que esta distancia de zona de baja velocidad debería variar en función del tiempo, a medida que se pasa del fenómeno de hora punta a la hora valle de la red adyacente a la delegación. Sin embargo, no se ha realizado esta consideración ya que no existe una formulación matemática general y simple que determine la localización de los puntos de inicio de la congestión en función del tiempo.

Tabla 7.4. Tiempos y velocidades de congestión adoptados en los problemas generados

Tiempo de congestión total diario t_c	Velocidades en congestión
10 horas (100%)	
8 horas (80%)	80 km/h
6 horas (60%)	55 km/h
4 horas (40%)	30 km/h
2 horas (20%)	10 km/h
0 horas (0%)	

7.2.2. Análisis de resultados en los escenarios de estudio

Los distintos escenarios del problema descrito anteriormente se han resuelto utilizando el algoritmo de TS con los criterios de parada y de aplicación recomendados en el capítulo 4. Los resultados se recogen en la Tabla 7.5 y Figura 7.9, presentado un incremento relevante de los costes de distribución para variación de los tiempos de

congestión y la velocidad de circulación en los tramos congestionados. Esta variación es realmente significativa para velocidades $v < 30$ km/h.

Tabla 7.5. Detalle de escenarios y evaluación del coste total de transporte con la herramienta TS

		Datos problema				Algoritmo con Mov, Peddling								
		Zona congestionada		Velocidad		Horas HP		Coste (€)		Rutas	Envíos (i,j)			
		dc (km)	vs (km/h)	ve (km/h)	Tc (h)	Coste inicial (€)	Coste TS (€)	Envíos totales	Envíos directos		Envíos hub	Envíos peddling		
NO UNIFORME	E1	--	80	80	0	72221,1	54289,5	87	628	267	120	241		
	E2	15	55	55	10	75585,4	59496,8	100	628	288	118	222		
	E3	15	30	30	10	85662	69345,6	128	628	321	118	189		
	E4	15	10	10	10	136797	125148	301	628	455	54	119		
	E5	15	55	55	8	73941,4	58372,5	97	628	282	112	234		
	E6	15	30	30	8	80193,8	65960	119	628	299	100	229		
	E7	15	10	10	8	106345	91271	194	628	359	61	208		
	E8	15	55	55	6	73460,8	58810,6	98	628	279	110	239		
	E9	15	30	30	6	78902	61221,4	107	628	272	130	226		
	E10	15	10	10	6	94113,8	75608	148	628	330	105	193		
	E11	15	55	55	4	71294,9	55516,7	91	628	259	117	252		
	E12	15	30	30	4	72595,3	56517,6	97	628	257	131	240		
	E13	15	10	10	4	88716,7	70996,6	134	628	288	128	212		
	E14	15	55	55	2	72044,3	55078,9	90	628	266	112	250		
	E15	15	30	30	2	73367,9	56063,5	97	628	275	120	233		
	E16	15	10	10	2	78078,5	60041,3	106	628	256	138	234		

Evolución de los costes de transporte por efecto de la congestión

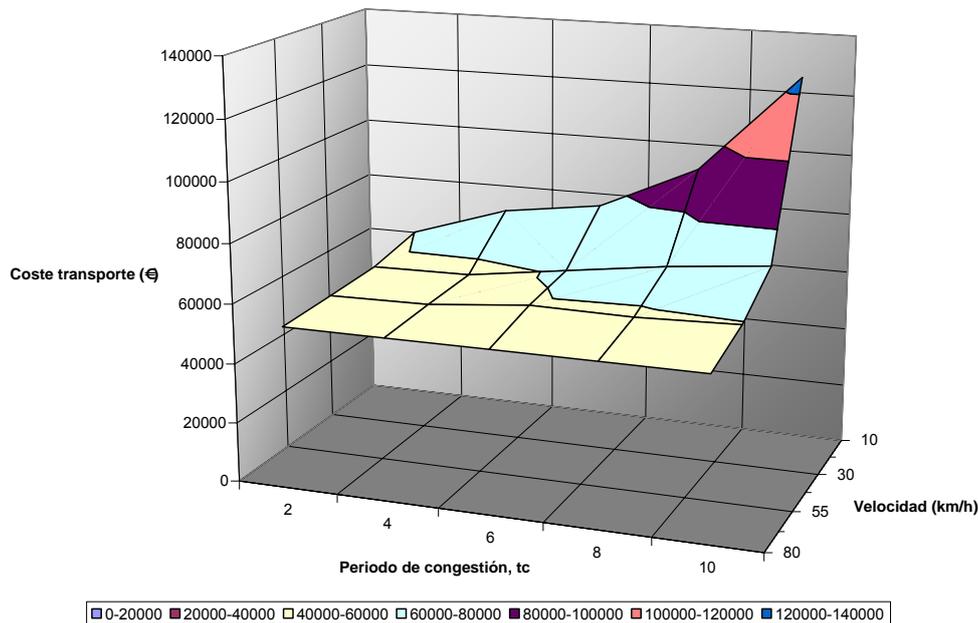


Fig. 7.9. Evolución de los costes de transporte por efecto de la congestión

Los resultados obtenidos en los Escenarios 2-16 se deben comparar con el Escenario 1 que representa situaciones sin congestión en toda la red y en toda la jornada de reparto. El caso de máxima afectación es el escenario E-4, donde las velocidades de entrada y salida de la delegación son de 10 km/h en todo el periodo de distribución. En este caso, el número de rutas necesario se incrementa en un 350% y el coste total de la

distribución en un 230% respecto al caso sin congestión. Este escenario (E-4) corresponde al punto de máximo valor de la superficie de coste de la Figura 7.9. Se puede apreciar que la tasa de crecimiento de los costes no es constante con la reducción de velocidad o incremento de t_c .

Finalmente, se ha evaluado el nuevo tiempo medio de envío entre dos delegaciones por medio de la ecuación (7.10), cuyo valor se ha utilizado en la ecuación (6.9) para calcular el número de rutas final $\tilde{N}_r(\bar{B})$. Se puede comprobar que existe una relación entre el incremento estimado de número de rutas y el incremento en el coste total de distribución según la Tabla 7.6.

Tabla 7.6. Estimación del incremento del número de rutas y del incremento de coste en relación al Escenario 1

Solución algoritmo TS		Estimación incremento de coste por congestión						
Coste TS (€)	Rutas	Núm Envío medio por ruta	Estimación rutas (ecuación 7.7+6.9)	% Incremento rutas Escenarios respecto E-1	Estimación % incremento coste transporte Escenarios respecto E-1	Estimación Coste total (€)	Porcentaje error	
		$(1/\bar{B})$	$\tilde{N}_r(\bar{B})$	$\frac{(\tilde{N}_r)_{E-x} - (\tilde{N}_r)_{E-1}}{(\tilde{N}_r)_{E-1}}$	$\rho_1 \frac{(\tilde{N}_r)_{E-x} - (\tilde{N}_r)_{E-1}}{(\tilde{N}_r)_{E-1}}$	$\rho_1 \frac{(\tilde{N}_r)_{E-x} - (\tilde{N}_r)_{E-1}}{(\tilde{N}_r)_{E-1}} (C_T)_{E-1}$		
E-1	54289,48	87	3,239	101,339				
E-2	59496,8	100	3,069	118,529	0,170	0,055	57254,829	-3,77%
E-3	69345,61	128	2,694	159,295	0,572	0,184	64286,918	-7,29%
E-4	125147,9	301	1,751	506,656	4,000	1,288	124207,106	-0,75%
E-5	58372,52	97	3,103	114,888	0,134	0,043	56626,757	-2,99%
E-6	65959,98	119	2,803	145,959	0,440	0,142	61986,536	-6,02%
E-7	91271,02	194	2,048	346,827	2,422	0,780	96636,510	5,88%
E-8	58810,56	98	3,137	111,464	0,100	0,032	56036,122	-4,72%
E-9	61221,44	107	2,912	134,684	0,329	0,106	60041,557	-1,93%
E-10	75607,97	148	2,346	224,779	1,218	0,392	75582,966	-0,03%
E-11	55516,73	91	3,171	108,238	0,068	0,022	55479,672	-0,07%
E-12	56517,55	97	3,021	124,178	0,225	0,073	58229,308	3,03%
E-13	70996,56	134	2,644	166,269	0,641	0,206	65489,925	-7,76%
E-14	55078,85	90	3,205	105,194	0,038	0,012	54954,523	-0,23%
E-15	56063,54	97	3,130	112,192	0,107	0,034	56161,705	0,18%
E-16	60041,26	106	2,941	131,928	0,302	0,097	59566,088	-0,79%
				ρ_1	0,322			

La estimación del número de rutas mediante las ecuaciones (6.9)-(7.10) sobreestima el valor real encontrado con el algoritmo. Sin embargo, si se considera el coste de distribución en el Escenario 1 sin congestión, se puede estimar el coste en cualquier otro escenario por medio de la evaluación del incremento del número total de rutas respecto E-1. La expresión que permite realizar la estimación del coste total de distribución en un escenario x $(C_T)_{E-x}$ es la ecuación (7.11), donde la notación $(y)_{E-1}$ representa el valor de la variable y en el Escenario 1 sin congestión e $(y)_{E-x}$ el valor de la variable y en el Escenario de estimación x .

$$(C_T)_{E-x} = \left\{ 1 + \rho_1 \frac{(\tilde{N}_r)_{E-x} - (\tilde{N}_r)_{E-1}}{(\tilde{N}_r)_{E-1}} \right\} (C_T)_{E-1} \quad (7.11)$$

El parámetro ρ_1 es un coeficiente de proporcionalidad entre los incrementos del número de rutas estimadas y los incrementos de coste total de la distribución. Este parámetro se debe calibrar según la distribución de la carga de los envíos y el tipo de vehículo (posibilidades de consolidación). En el caso de aplicación el valor que ha minimizado la suma al cuadrado de las diferencias entre el coste estimado y coste real ha sido de $\rho_1=0,322$.

Este hecho implica que el algoritmo de resolución *TS* permite reconfigurar la solución y estructura de las rutas para ahorrar en un 66% el incremento esperado en el número de rutas por efecto de la congestión en la red de acceso a las instalaciones.

8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

La distribución de mercancías de muchos orígenes a muchos destinos constituye un problema de optimización combinatoria de elevada complejidad. La eficiencia exigida al servicio de las empresas de transporte justifica el desarrollo de herramientas matemáticas que permitan encontrar una solución operacional de mínimos costes y de nivel de servicio adecuado con unos requerimientos computacionales abordables.

Las contribuciones científicas en este campo se han basado en modelos de programación matemática no lineal. Los modelos se han centrado en la determinación de la localización óptima de terminales (diseño de red), y en menor medida en el diseño de rutas de transporte de muchos orígenes a muchos destinos (operativa). Debido a la complejidad combinatoria asociada al problema (*NP-Hard*), únicamente se puede encontrar la solución exacta en redes de tamaño reducido. El número de variables requerido para problemas físicos reales y el extenso conjunto de restricciones sobre los cumplimientos temporales y capacidad de los recursos impide identificar las redes de distribución óptimas a una escala real. Las limitaciones de aplicación de la programación matemática han motivado el surgimiento de algoritmos computacionales heurísticos. Su objetivo se ha centrado en encontrar un equilibrio entre la bondad de la solución sub-óptima y el coste computacional acotado que garantice su aplicabilidad a un problema de escala real. El desarrollo de estos algoritmos se ha complementado con la generación de herramientas matemáticas basadas en inteligencia artificial y algoritmos metaheurísticos. Su papel fundamental se centra en el refinamiento de la solución por medio de un proceso de búsqueda iterativa guiada por criterios probabilísticos en el dominio de soluciones.

En esta tesis se ha propuesto una metodología para la planificación operativa y diseño de redes de distribución de larga distancia de muchos orígenes a muchos destinos basada en el algoritmo metaheurístico *Tabu Search* (Búsqueda Tabú, TS). Esta herramienta ha permitido reproducir configuraciones de redes de transporte de mercancías a escala real, como la consideración de restricciones sobre la capacidad y número de recursos y el control temporal de los procesos (ventanas temporales).

La validación de la herramienta propuesta en las reducidas baterías de problemas existentes de *benchmarking* de algoritmos ha encontrado la solución de mínimo coste. Así mismo, en el proceso de calibración de los parámetros del algoritmo TS se ha comprobado que la solución inicial de partida calculada con un algoritmo heurístico es significativamente buena para problemas a carga completa (relación entre volumen de envío medio y capacidad del vehículo superior al 50%). En estos casos, la aplicación del proceso de refinamiento local con el algoritmo TS en todas las baterías de problemas es del 6-7%. Sin embargo, la solución de partida para problemas con envíos de tamaño reducido (ocupación de un envío medio en un vehículo inferior al 10%) es ampliamente optimizable. En estos casos, la aplicación del metaheurístico TS consigue una reducción de costes del 25 % en problemas de tamaño reducido ($N_T < 25$ delegaciones) y de un 12-15% para problemas de mayor tamaño.

Estos valores de optimización de la solución inicial están calculados con un número máximo de iteraciones igual a $2000N_T$ (N_T , número de delegaciones del problema), que supone un tiempo medio de cálculo igual a 96; 672 y 1600 segundos para problemas de tamaño reducido, medio y de gran tamaño ($N_T > 60$ delegaciones) respectivamente. Este rendimiento está asociado a un ordenador con procesador Intel Core2 Duo de 1024Mb de RAM y 530MHz.

La calibración del algoritmo de Búsqueda Tabú (TS) ha determinado unos valores recomendables de los parámetros que intervienen en el algoritmo. En particular se han encontrado resultados satisfactorios en el proceso de reinicialización del TS cuando el número de iteraciones sin mejora de la solución actual (N_3) y de la solución factible (N_2) es de $N_2 = N_3 = 0,2N_T$. En relación al parámetro *tabu tenure* (θ), que determina el número de iteraciones en que un atributo de la solución es considerado tabú, se ha encontrado un comportamiento aceptable para $\theta = 100$, aunque en este caso la sensibilidad de la solución a este parámetro no es tan alta como los criterios de parada o de reinicialización comentados anteriormente.

La capacidad de optimización del algoritmo ha sido ampliada con una metodología probabilística de aceptación de envíos *peddling* (paradas múltiples). Esta metodología está basada en la definición según criterios probabilísticos de un elipse como lugar geométrico de los puntos con envío *peddling* potencialmente rentable. En estos casos, la mejora de la solución con la inclusión de este procedimiento ha sido en términos medios del 10% en relación al algoritmo TS básico. Esta metodología tiene unas prestaciones diferenciales cuando se aplica a problemas con envíos de poco volumen en relación a la capacidad de los vehículos (*Less Than Truckload, LTL*).

La aplicación de la herramienta de resolución a un conjunto de baterías de problemas derivados de datos promedio en redes reales ha permitido identificar aspectos estratégicos en el diseño de redes eficientes de distribución de larga distancia. El análisis de sensibilidad del coste total de distribución presenta una tasa de crecimiento constante en relación al coste de parada y al coste de transferencia en terminales para problemas con una alta ocupación media de envío (*Full Truck Load, FTL*). En las baterías donde el volumen de envío medio es igual o superior a 30 m^3 , la adopción de la tipología de vehículos de mayor capacidad en el mercado (80 m^3) resulta siempre eficiente.

Sin embargo, en problemas típicamente *LTL* donde el tamaño de envío es reducido (volumen medio de envío inferior a 10 m^3), el coste total de distribución presenta un comportamiento altamente sensible a los parámetros coste de parada (c_p) y coste de transferencia (c_t). En estos casos las estrategias de consolidación de la carga (*peddling* o envío *hub*) son más necesarias para garantizar la eficiencia del sistema. En este contexto, la tipología de vehículos más eficiente es la de menor capacidad (V_3 , con $33,5 \text{ m}^3$) siempre que el coste de parada sea reducido ($c_p < 35 \text{ €/parada}$) y para altos costes de transferencia ($c_t > 2 \text{ €/m}^3$). En el caso que no se cumplan estas condiciones y se verifique $c_p > 35$, $c_t < 2 \text{ €/m}^3$, la tipología de vehículos que resulta más eficiente es la mayor capacidad (V_1 de 80 m^3) al permitir una consolidación de la carga por medio de estrategia de envío *hub*. Esta afirmación únicamente se cumple para problemas reales donde la distribución de los envíos entre las delegaciones origen y destino no es uniforme, sino que sigue una distribución *Weibull*.

En los casos idealizados de distribución de envíos uniformes entre delegaciones y volumen medio de envío inferior a 10 m^3 (típicamente *LTL*), las potencialidades de optimización con la aplicación de estrategia *hub* y vehículos de máxima capacidad (V_1) se reducen drásticamente a medida que el número de delegaciones N_T crece. La tipología de vehículos V_1 únicamente es viable si el número de delegaciones es inferior a 25.

Otro aspecto estratégico a considerar es que la determinación del número óptimo de terminales *hub* es muy sensible a sus costes de instalación. A nivel puramente operacional, sin la consideración del coste de instalación, cualquier incremento en el número de *hubs* aumenta el número de envíos vía *hub*. Este hecho permite una mayor consolidación de la carga en toda la red y consecuentemente produce la reducción de costes totales del sistema. De este modo, este hecho implicaría la consideración a priori de que cada delegación del sistema fuese *hub*, es decir $h=N_T$.

No obstante, cuando se considera el coste real de construcción o adaptación de una terminal *hub* en el sistema, existe un valor óptimo del número de *hubs* $h \neq N_T$. En situaciones reales con distribución no uniforme de envíos con volumen medio superior a 30 m^3 , el número óptimo de *hubs* es de 1 ó 2 terminales para problemas con un número de delegaciones inferior a 25. En el caso de problemas de tamaño medio ($N_T \approx 45$) el número de *hubs* óptimo es $h^* = \{3,4\}$.

En el caso de gestionar envíos con un volumen medio inferior a 10 m^3 o problemas con un coeficiente de transferencia reducido ($c_r \approx 0,1 \text{ €/m}^3$), los costes de instalación del *hub* juegan un papel muy importante. En este contexto específico, si el incremento de coste de instalación mínimo es inferior a 1.000 €/día, la función de costes no es estrictamente creciente ni decreciente para incrementos de la variable de decisión h . En estos casos, las variaciones de costes asociadas a los cambios de estrategia de los envíos son de mayor magnitud a los costes de inversión en la instalación y no se puede identificar un número de *hubs* específico. Sin embargo, cuando el coste de instalación mínimo es $c_r^{\min} > 1.000 \text{ €/día}$, el número óptimo de terminales de consolidación varía en $h^* = \{2,5\}$.

Un número alto de *hubs* únicamente es recomendable cuando se tiene un volumen medio de envío bajo ($\bar{w}_{ij}/C < 0,25$; donde \bar{w}_{ij} es el volumen medio entre delegaciones y C la capacidad del vehículo), costes de unitarios de transferencia muy inferiores a los costes de parada ($c_t \ll c_p$) y a los kilométricos ($c_t \ll c_d$) y cuando los costes de transferencia sean menores a la relación entre el coste fijo de servicio de un vehículo F y el tamaño medio de envío \bar{w}_{ij} ($c_t \ll F/\bar{w}_{ij}$).

El análisis de aplicación de la herramienta de resolución ha concluido con el desarrollo de una función estimativa de los costes totales del sistema de distribución. Se ha propuesto una formulación consistente que en una primera iteración determina el número de rutas del sistema. Esta variable resulta esencial para la cuantificación de los recursos y costes. La función estimativa presenta como variables de entrada el número

de envíos del sistema entre delegaciones, el número de delegaciones, un factor estimativo del número de arcos de cada ruta (dependiente de las limitaciones temporales del sistema) y una variable que caracteriza el volumen medio de un envío. La función se ha estimado por regresión no lineal con un coeficiente de correlación R^2 superior a 0,971 para distribución de envíos uniforme y de 0,915 para envíos con distribución no uniforme. La componente del ajuste asignable a los errores de la regresión es inferior al 0,5% en ambos casos. Posteriormente, se ha estimado el número de envíos vía *hub* y la distancia total recorrida en la distribución. Se debe destacar que en el ajuste del número de envíos vía *hub* el coeficiente de correlación encontrado no es representativo de un ajuste óptimo. Sin embargo, debido a que la componente de costes atribuible a las operaciones de transferencia en el *hub* presenta una magnitud significativamente inferior a las demás componentes, se ha aceptado su inclusión en el modelo. Finalmente, la formulación estimativa ha permitido cuantificar los costes de distribución de problemas de varios tamaños con un error medio entorno al 5% y un error máximo del 16%. Esta metodología es utilizable para problemas con un volumen medio de envío reducido- medio (inferior a 40 m³), que es precisamente el tipo de problema donde se aplican en mayor medida las estrategias de consolidación de carga (problemas *LTL*).

Los problemas de congestión en las instalaciones pueden llegar a inducir incrementos de coste significativos. Aunque la mayor parte del periodo de distribución los vehículos están en la ruta superando distancia, existe una componente de tiempo en que los vehículos permanecen en las delegaciones en operaciones de carga. Los costes de transporte aumentan a mayores tiempos unitarios de carga y descarga y a mayor volumen de carga medio. En relación a este último caso, los costes totales con el efecto de congestión en los problemas con carga $w_{ij} \in [0, 80]$ m³ son en general un 50% superiores al problema con $w_{ij} \in [0, 20]$ m³ debido al mayor tiempo de carga. En este último caso, la posibilidad de consolidación de la mercancía permite la reducción de la flota a transportar en relación al mismo número de envíos. Este efecto, conjuntamente con el menor tiempo de carga y descarga, permiten una menor ocupación de los muelles de carga en los problemas con $w_{ij} \in [0, 20]$ m³.

El máximo porcentaje de utilización de los muelles en los problemas con bajo volumen medio - $w_{ij} \in [0, 20]$ m³- ha sido inferior al 15%; mientras que en problemas con volumen medio de carga elevado el porcentaje alcanza un máximo de 55% para delegaciones con 2 muelles de carga. En general, para los flujos de problemas analizados, una delegación con un número de muelles igual o superior a 10 no ha presentado problemas de congestión.

En el caso de congestión de la red de transporte entre las delegaciones, se ha determinado un comportamiento no lineal entre el coste de transporte y la reducción de la velocidad de circulación o el incremento del tiempo de duración del episodio de congestión. En particular, la reducción de las velocidades normales de circulación de 80 km/h a 55 km/h en entornos a menos de 15 km de las delegaciones no conlleva un incremento de coste significativo (incremento inferior a 5,5%). Esta característica se ha identificado de forma independientemente de la duración del episodio de congestión. Sin embargo, cuando la velocidad de recorrido en los entornos de las delegaciones ha sido inferior a 30 km/h (en valor promedio), los costes de transporte presentan incrementos relevantes, hasta llegar a valores del 130% del coste ideal (sin congestión) cuando se presentan velocidades de 10 km/h en los entornos a menos de 15 km de las delegaciones y durante toda la jornada de reparto.

Adicionalmente, se ha determinado una relación válida para la estimación de los costes de transporte en escenarios congestionados. Esta estimación se ha efectuado a partir de la relación teórica entre el número de rutas en el escenario congestionado y el ideal sin congestión, y con la valoración del coste de transporte en situaciones de libre circulación. La aplicación de esta metodología de estimación ha cometido un error inferior al 7,5 % en la batería de problemas de transporte analizada.

A nivel general, los resultados demuestran que la planificación y diseño de rutas de la red troncal de una empresa de paquetería necesita un tratamiento integrado de estrategias de envío directo, vía hub y especialmente de paradas múltiples para maximizar la eficiencia y flexibilidad de sistemas ya implantados.

Las líneas de investigación futura que merecen un análisis detallado se basan en el desarrollo de metodologías de planificación y control de la red troncal conjuntamente con la red capilar (PUD, *pick-up and delivery*). Estas metodologías permitirían la optimización del número de delegaciones y zona de influencia teniendo en cuenta la operativa de vehículos a larga distancia (red troncal) con los problemas de congestión, control dinámico de la red capilar y plazos temporales. La localización óptima de terminales se ha analizado siempre desde el punto de vista de un problema de asignación de flujos. En este sentido, sería importante desarrollar metodologías para la localización de instalaciones que estuvieran basadas en un problema de rutas para poder minimizar los retornos en vacío, aspecto que los modelos tradicionales de flujos no consideran.

Otro aspecto a analizar es el incremento de la eficiencia de la herramienta de cálculo basada en el TS por medio de la mejora de los movimientos de intercambio y los

criterios de reinicialización. Aunque la capacidad computacional conseguida hoy en día es suficiente para la resolución de problemas de tamaño pequeño, las mejoras en este campo permitirían incrementar la velocidad de cálculo para mejorar la solución obtenida.

Adicionalmente, un campo de interés que puede resultar significativamente provechoso para el mundo profesional es la aportación de formulaciones compactas estimativas de los costes de transporte en relación a las variables del sistema. Si bien en esta tesis se ha desarrollado una metodología en esta línea, la formulación propuesta únicamente es aplicable a un conjunto de problemas con atributos y características particulares. Esta contribución se podría completar con formulaciones aplicables en otros contextos y escenarios.

Una de las líneas de máximo interés en el campo científico es el control dinámico de las flotas y rutas de distribución, especialmente en el caso de operar en zonas con fenómenos de congestión importantes. En estos casos, la posibilidad de poder efectuar cambios en la operativa de envíos según las condiciones del tráfico puede conllevar la reducción de costes y recursos si bien exige un conocimiento y control mayor del comportamiento del sistema. Su importancia y aplicabilidad se basan tanto en la red capilar que opera en entornos urbanos como también en las rutas de larga distancia de acceso a las instalaciones.

Finalmente, un campo de investigación a desarrollar es la concepción integrada del *packing* en el proceso de optimización de las rutas. El planteamiento realizado para servir un flujo W_{ij} entre dos puntos $(i,j) \in N$ consistía en establecer $\lceil W_{ij}/C \rceil$ camiones a carga completa y un vehículo a carga parcial con una ocupación de $\{W_{ij}/C\}$. Sin embargo, se puede proponer una gestión integrada en que la capacidad de cada vehículo sea una variable aleatoria C_k con una distribución uniforme entre un límite inferior representativo de un *packing* desorganizado y un límite superior asociado a una optimización del espacio interior del vehículo y del *packing*, de forma que: $C_k \sim U [C(1-\alpha), C(1+\beta)]$. En estos casos se puede suponer que $\alpha \approx 0,1$ y que $\beta \approx 0,05$. De este modo, los envíos a transportar por aquellas rutas $r \in R$ que sirvan un par común de puntos $(i,j) \in N$ deben ser reasignados entre las rutas para poder optimizar la ocupación de los vehículos de cada ruta. En este caso, la ocupación de cada vehículo será la óptima para minimizar la flota utilizada y no será necesaria la descomposición del problema en un conjunto de envíos a carga completa y el resto a carga parcial.

