

## **Oportunidades del *daily drayage problem* en la optimización del transporte de mercancías europeo.**

**Daily drayage problem opportunities to optimize the European freight transport**

**Escudero A<sup>1</sup>, Muñuzuri J, Onieva L, Arango C.**

**Abstract** The freight transportation is one of the main sectors in the European Union. In the last decades, it grew up more than the GPB. This growth was not proportional on all the transportation modes. It has associated negative effects: accidents, pollution and congestion. The UE looked to the intermodality like the main alternative. However, the crisis in Europe do not possible the inversion on great infrastructure. This work pretends to optimize and improve the use of the intermodality through the drayage.

**Resumen** El transporte de mercancías es uno de los sectores más importantes dentro de la Unión Europea. Su crecimiento en los últimos años ha incluso superado al crecimiento del PIB. Este crecimiento no ha sido proporcional entre todos los modos de transporte, siendo el mayor beneficiario el transporte por carretera. Esto ha traído asociado una serie de fenómenos negativos: accidentalidad, polución y congestión. La Unión ha señalado a la intermodalidad como la alternativa. Sin embargo, en el actual periodo de crisis que vive Europa, inversión en las grandes infraestructuras necesarias es posiblemente una quimera. Este artículo pretende optimizar y facilitar el uso de la intermodalidad a través de la optimización de uno de los eslabones principales de la cadena intermodal, el acarreo terrestre.

**Keywords:** Drayage, Intermodality, Genetic Algorithm; **Palabras clave:** Acarreo, Intermodalidad, Algoritmos Genéticos.

---

<sup>1</sup> Alejandro Escudero Santana (✉)

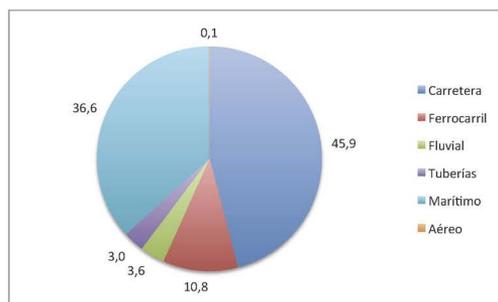
Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla, Spain  
e-mail: aescudero@esi.us.es

## 1.1 El transporte de mercancías europeo

El transporte de mercancías es sin lugar a dudas uno de los sectores más importantes dentro de la Unión Europea. Tomando datos diferentes de diferentes publicaciones de la Comisión Europea y de la oficina de estadísticas Eurostat, por cada uno de los más de 500 millones de habitantes de la Unión una tonelada de bienes es transportada diariamente una media de 22,5 km.

La tendencia de crecimiento del transporte ha sido tal, especialmente en el transporte de mercancías, que incluso ha superado el crecimiento del PIB en ciertos periodos.

Sin embargo, este crecimiento experimentado por el transporte no ha sido ecuánime entre todos los modos de transporte. Sin lugar a dudas, el transporte de carreteras ha sido el que mayor crecimiento ha experimentado. El reparto modal para el transporte de mercancías en el año 2008 puede observarse en la Fig 1.1.



**Fig. 1.1** Reparto modal según modo de transporte para el transporte de mercancías de la Unión Europea en el año 2008.

Actualmente, el desequilibrado sistema de transporte de la UE a traído ligado una serie de fenómenos negativos que pueden poner en juego su sostenibilidad. Entre todos estos fenómenos destacan el aumento de la congestión, la accidentalidad y el impacto ambiental.

Es trabajo está dividido en seis secciones. El apartado 2 presenta la intermodalidad como alternativa definida por la UE al transporte monomodal por carretera. El apartado 3 y 4 definen y formula unos de los eslabones de la cadena intermodal, el acarreo terrestre. El apartado 5 presenta las oportunidades que la optimización de acarreo representa. Finalmente, se presentan las conclusiones y referencias.

## 1.2 La intermodalidad como alternativa

Este contexto, la política europea de transporte ha marcado un objetivo prioritario: “La necesidad de un equilibrio de los diferentes modos de transporte para ga-

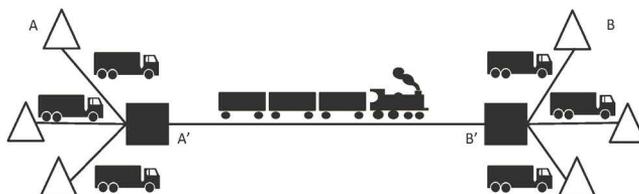
rantizar la movilidad, luchando contra la congestión y los efectos medioambientales, bajo los parámetros de seguridad y calidad exigidos por los ciudadanos”.

Desde la UE se buscan alternativas, transportes más sostenibles que pudieran ayudar a paliar los efectos perjudiciales que el transporte por carretera conlleva. Señalando a la intermodalidad como alternativa al transporte por carretera y solución a los problemas que este trae ligado.

El Congreso Europeo de Ministros de Transporte (1993), y la Comisión Europea (1997) definen la intermodalidad como

“Movimiento de bienes en una misma unidad de carga o vehículo, que usa sucesivamente varios modos de transporte sin manejo de los bienes en los cambios de modos”.

Un esquema básico del transporte intermodal, particularizado al caso ferroviario, es presentado en la Fig 1.2. Aunque la infraestructura de carretera permita un envío directo de mercancías entre el cargador A y el destinatario B, el transporte carretera-ferrocarril permite otra alternativa donde un contenedor, semirremolque o caja móvil sale del almacén del remitente hacia la estación intermodal A'. En la estación A' la carga es transferida o transbordada, sin manipulación, a una plataforma ferroviaria. A partir de aquí, se inicia el trayecto ferroviario hasta una estación B', donde la carga pasa de un modo ferroviario a la carretera, lo cual permite que la mercancía llegue al destino B.



**Fig. 1.2** Esquema del transporte intermodal de mercancías.

El transporte intermodal intenta aprovechar la sinergia entre los modos de transporte involucrados. Por un lado, se usa un modo de transporte con gran flexibilidad, usualmente la carretera, que llevaría a cabo los trayectos inicial y final. La operativa de recogida y entrega del contenedor entre terminal y clientes finales suele definirse como remolcado, acarreo o *drayage*. Para el trayecto intermedio, *line-haul*, suelen usarse modos que presenten una mayor economía de escala, por ejemplo el ferroviario o marítimo. Este trayecto intermedio suele ser un porcentaje muy elevado de la distancia total recorrida en el envío.

### 1.3 El acarreo terrestre

El acarreo terrestre o *drayage* conlleva la realización de los trayectos inicial y final del transporte intermodal de mercancías. En una región determinada, envuelve el movimiento de contenedores y trailers entre los clientes, la terminal y el depósito. Un resumen completo de todos los movimientos posibles dentro del acarreo intermodal es mostrado en la Figura 1.3

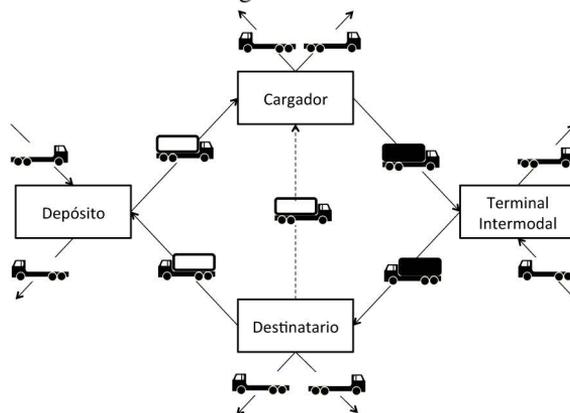


Fig. 1.3 Diferentes movimientos en las operaciones de acarreo.

El *drayage*, aunque sólo representa una pequeña parte de la cadena intermodal, supone más del 40% de los costes del transporte. Este hecho marca la importancia de la optimización de este eslabón de la cadena.

Optimizar el acarreo terrestre, supondrá disminuir la distancia de ruptura a partir de la cual la intermodalidad es rentable (Escudero et al. 2007). Además, es importante señalar que esta mejora de la cadena intermodal requiere un escaso nivel de inversión, algo especialmente importante en la situación de crisis actual.

### 1.4 Formulación del *daily drayage problem*

El problema de la gestión centralizada del acarreo, *daily drayage problem* (DDP), tiene por objetivo minimizar los costes de todas las operaciones de acarreo que son llevadas a cabo por una empresa, o consorcio de empresas, en una región determinada teniendo en cuenta todas las limitaciones existentes. Cuando una de las limitaciones hace referencia a ventanas temporales en las cuales se han de realizar las tareas, se estaría hablando del *daily drayage problem with time windows* (DPTW).

El DPTW es definido sobre un grafo,  $G=(T, A)$ , donde  $T$  representa al conjunto de tareas.

Sea  $i \in T$  una tarea. Esto involucrará la recogida del contenedor en el origen de la tarea,  $O_i$ , y su entrega en el destino,  $D_i$ . La distancia euclídea entre origen y destino proporcionará la distancia recorrida durante la realización de la tarea,  $d_i$ , y el tiempo necesario de desplazamiento,  $t_i$ . Los tiempos de servicio en origen y destino,  $s_i^O$  y  $s_i^D$ , son conocidos y representarán los tiempos de carga y descarga del contenedor. Las tareas serán clasificadas en tareas de importación de contenedores,  $T^I$ , y en tareas de exportación de contenedores,  $T^E$ . Las tareas de importación conllevan la recogida de un contenedor de la terminal y entrega en un cliente final, por tanto, el origen de la tarea es la terminal y el destino es el cliente. Sin embargo, en las tareas de exportación el origen se encuentra en el cliente y el destino es la terminal.

Las tareas estarán caracterizadas por unas ventanas temporales en origen y destino. Estas ventanas reflejan los tiempos entre los que debe comenzarse a realizar la carga del contenedor en el origen,  $[E_i^O, L_i^O]$ , y los tiempos entre los que debe empezar a descargarse la carga en el destino,  $[E_i^D, L_i^D]$ .

Aunque los tiempos en los cuales se puede llevar a cabo la realización de una determinada tarea pueden venir definidos tanto por el cliente como por la terminal. En el caso de tiempos de tránsito determinista no es necesario tener definidas ambas ventanas temporales, de inicio y fin de la tarea. Según el procedimiento llevado a cabo por Jula y Ioannou (2008), se pueden redefinir las restricciones de ambas ventanas en una sola,  $[E_i, L_i]$ . Por conveniencia se definirán las ventanas en el origen de la tarea.

La jornada laboral también estará marcada por una ventana temporal, de modo que todos los vehículos deberán volver al depósito antes del final de la jornada. Por simplicidad se considerarán al depósito y a la terminal en la misma localización.

La duración de la jornada temporal de cada vehículo, su posición al comienzo del día y destino final, así como los horarios de apertura de la terminal intermodal serán modelados como tareas ficticias. De este modo, dos tareas ficticias serán creadas para cada vehículo, una de inicio de la jornada y otra de finalización de la misma,  $T_f^{ini}$  y  $T_f^{end}$ . Sin pérdida de generalidad, el origen y destino de todas estas tareas ficticias será la terminal, por lo que el tiempo de tránsito, la distancia recorrida y, de igual modo, el tiempo de servicio serán igual a cero. Las ventanas temporales de estas tareas reflejarán las limitaciones temporales de la terminal y de los vehículos.

El conjunto de tareas  $T$  estará formado por dos grandes subconjuntos, las tareas reales,  $T_r$ , que englobará el conjunto de ordenes de acarreo a realizar en una jornada, y las tareas ficticias,  $T_f$ , que han sido creadas de un modo artificial para crear las limitaciones temporales de la terminal y los vehículos.

El conjunto  $A$  es definido como el conjunto de arcos que unen a los nodos  $T$  del grafo  $G = (T, A)$ . Dado que el conjunto de nodos representa las tareas a realizar en un horizonte temporal dado y no una posición fija en el espacio, el arco  $(i, j) \in A$  es principio diferente al arco  $(j, i)$ . Por lo tanto, el conjunto de arcos  $A$  es asimétrico.

Cada arco  $(i,j) \in A$  estará caracterizado por un tiempo de transito  $t_{ij}$  y una distancia  $d_{ij}$ .

Los costes asociados a una determinada solución serán los costes de los vehículos usados,  $c_v$  y la distancia total recorrida en vacío,  $d_{ij}$ . Al imponer que todas las tareas deben de ser cubiertas, el computo de la distancia recorrida con un contenedor no es de especial importancia en la búsqueda de la solución óptima.

Dos variables han sido definidas para resolver el modelos:  $x_{ijv}$  y  $st_i$ . La primera,  $x_{ijv}$ , tomará el valor 1 si la tarea  $i$  y la tarea  $j$  son servidos consecutivamente por el vehículo  $v$ . La segunda,  $st_i$ , es el tiempo en el que comienza a ser servida la tarea  $i$ .

El modelo a resolver es:

$$\text{mín} \sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} \sum_{j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} \sum_{v \in \mathcal{V}} d_{ij} x_{ijv} + \sum_{v \in \mathcal{V}} \left( c_v \sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini}} \sum_{j \in \mathcal{T}_r} x_{ijv} \right) \quad (1.1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} \sum_{v \in \mathcal{V}} x_{ijv} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}, \quad (1.2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} \sum_{v \in \mathcal{V}} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad (1.3)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} x_{ijv} - \sum_{i \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} x_{jiv} = 0 \quad \forall j \in \mathcal{T}_r, \quad v \in \mathcal{V}, \quad (1.4)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} x_{ijv} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad v \in \mathcal{V}, \quad i \neq v, \quad (1.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{ini}} x_{ijv} = 0 \quad \forall j \in \mathcal{T}_f^{end}, \quad v \in \mathcal{V}, \quad j \neq v, \quad (1.6)$$

$$E_i \leq st_i \leq L_i \quad \forall j \in \mathcal{T}, \quad (1.7)$$

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} x_{ijv} \cdot (st_i + s_i^O + t_i + s_i^D + t_{ij} - st_j) \leq 0 \quad \forall i, j \in \mathcal{T}, \quad (1.8)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r, \quad j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}, \quad v \in \mathcal{V}, \quad (1.9)$$

$$st_i \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{T} \quad (1.10)$$

La función objetivo (1.1) trata de minimizar los costes de servir todas las tareas que se han de llevar a cabo durante la jornada. Las restricciones (1.2) y (1.3) aseguran que cada tarea, bien sea una tarea real o ficticia, sea visitada una sola vez. La restricción (1.4) se trata de una restricción de conservación de flujo en las tareas reales, de modo que si un vehículo realiza una tarea real debe abandonar con posterioridad dicha tarea para bien dirigirse a la realización de otra tarea real o hacia el depósito. Las restricciones (1.5) y (1.6) obligan a que las tareas ficticias estén asignadas a un vehículo específico, de modo que al vehículo esté asignado de manera inequívoca la tarea ficticia de inicio  $i$  y la tarea ficticia de fin  $i$ . Las restricciones temporales de cada tarea son impuestas por el conjunto de restricciones (1.7). Las restricciones (1.8) fuerzan a la consistencia de la variable  $st_i$ . Finalmente, las restricciones (1.9) y (1.10) definen el dominio de las variables de decisión.

El modelo que se ha planteado presenta una importante característica con respecto a otros existentes en la literatura científica (Bontekoning et al, 2004), el modelo es compatible con un sistema de reoptimización en tiempo real como el presentado por Escudero et al (2011).

## 1.5 Oportunidades del daily drayage problem

Europa ha definido su política de transportes centrada principalmente en la potenciación de un sistema intermodal de transporte. Prueba de ello son los ejes definidos como prioritarios por Bruselas para su inclusión en la Red Transeuropea de Transporte. En el caso de España seleccionados el corredor mediterráneo y el eje atlántico. El eje atlántico permitirá conectar Portugal con el centro de Europa a través del transporte ferroviario, el caso del corredor mediterráneo es especialmente importante, ya que permitiría convertir a España en el puerto de desembarco de las mercancías que llegan a Europa desde Asia a través del canal de Suez.

Sin embargo, todas estas infraestructuras necesitan de un alto desembolso de las arcas europeas y nacionales. Teniendo en cuenta la situación económica europea se hace previsible que estas infraestructuras tarden en llegar.

La gestión centralizada del acarreo terrestre, es decir, la optimización del *daily drayage problem* presenta oportunidades interesantes en el desarrollo del transporte intermodal en Europa. Su optimización supondría una mejora en el transporte sin la necesidad de grandes inversiones. Permitiría facilitar el escaso atractivo que actualmente tiene la intermodalidad reduciendo el coste para sus usuarios.

Este hecho ha sido reseñado por varios investigadores (Bontekoning et al, 2004), y la optimización del problema es un tema de candente actualidad científica.

## 1.7 References

- Bontekoning YM, Macharis C, Trip JJ (2004). Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature. *Transportation Research Part A*, 38, 1-34.
- Escudero A, Delgado MC, Muñuzuri J, Onieva L (2007). Modelo de ayuda a la decision en el transporte intermodal. In: *International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*. Madrid 5-7 September.
- Escudero A, Muñuzuri J, Guadix J, Arango C (2011) Heurística de asignación en tiempo real de vehículos a tareas de acarreo intermodal. *Dirección y Organización*, Núm. 45, 32-37.
- European Commission (1997). *Intermodality of goods transportation*. Communication 243. Brussels.
- European Conference of Ministers of Transport. (1993). *Terminology on combined transport*. In: *European Conference of Ministers of Transport*.
- Jula H, Iounnou P (2008). *Container Movements with Time Windows*. Intelligent Freight Transportation. CRC Press, Taylor & Francis Group.