

## Optimización del Llenado de Contenedores para Transporte Multimodal

Raúl Pino<sup>1</sup>, David de la Fuente<sup>1</sup>, Isabel Fernández<sup>1</sup>, Nazario García<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Administración de Empresas. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo. Campus de Viesques s/n, 33204 Gijón (Asturias). pino@uniovi.es, david@uniovi.es, ifq@uniovi.es, ngarciaf@uniovi.es

### Resumen

*En este trabajo, se analizan las razones por las que el transporte multimodal no está teniendo el desarrollo esperado, a pesar de las innegables ventajas que presenta desde el punto de vista de ahorro de costes, de mejor aprovechamiento de la energía etc. Como contribución en el intento de solventar estos problemas, presentamos una aplicación de algoritmos genéticos para el problema de carga de contenedores tratando de maximizar el volumen de carga alojado garantizando que se cumplen las restricciones de carga y así lograr una reducción en el número de fletes a contratar y por lo tanto una reducción en los costes.*

**Palabras clave:** Transporte Multimodal, Optimización, Algoritmos Genéticos.

### 1. Introducción

Un objetivo primordial de las políticas de transporte en la UE\* es promover la movilidad sostenible a través de servicios de transporte eficientes, adecuados en costes, seguros, ambientalmente limpios y socialmente aceptados. Este objetivo supone conceptualizar integralmente el sistema de movilidad: potenciando las cadenas de transporte que usan en cada tramo el modo de transporte más adecuado; optimizando cada modo y la cadena en su conjunto; o mejorando las conexiones entre modos para su mejor aprovechamiento, apoyándose en servicios avanzados de información y comunicación. Este nuevo concepto en la gestión de mercancías ha dado en llamarse “Transporte Multimodal”.

El transporte multimodal de mercancías se define como aquél que utiliza, al menos, dos medios de transporte diferentes bajo un único contrato de transporte, desde una localización en un país, hasta el punto designado para la entrega situado en un país diferente y donde, habitualmente, un único operador, se encarga de toda la operativa en la gestión de la mercancía.

La realidad ha constatado un decrecimiento del uso de este tipo de transporte en la UE (20% frente al 40% de EEUU) explicado por el déficit de su explotación y otros efectos negativos como: la menor fiabilidad en los plazos de entrega (por falta de puntualidad y regularidad), la menor disponibilidad de servicios de calidad, las limitaciones en el tipo de mercancías a transportar, el mayor riesgo de desperfectos o el aumento de complejidad de procedimientos administrativos. No obstante, son varios los estados de la UE con voluntad política y disposición a asumir subvenciones a este tipo de transporte, dadas las ventajas que inducirían: ahorro energético, disminución de contaminación, o disminución del coste social implicado.

---

\* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Fomento, con referencia MFOM-08-E12/08, titulado “Análisis, Desarrollo y Evaluación de Sistemas Inteligentes de Transporte de Mercancías en un Entorno Intermodal”.

Este trabajo está basado en un caso real realizado con la empresa CEVA, empresa que es el líder mundial en la prestación de servicio logístico a todos los grandes Fabricantes de Equipos Originales (OEM) y proveedores del sector automoción, especializada en la gestión de cadenas de suministro para empresas gran tamaño, cuenta con instalaciones en más de 100 países, y gestiona 614 almacenes de diversos sectores que suman una superficie de 8,6 millones de m<sup>2</sup>, y tiene una facturación anual de 6.300 Millones de €. En su colaboración, se han analizado las diferentes necesidades cuya carencia impide el desarrollo del transporte multimodal, y que pueden resumirse en tres vertientes:

- Infraestructuras. La necesidad de una red coherente de infraestructuras que provea de adecuados puntos de transbordo (nodos) que aporten valor añadido a la cadena de transporte y donde las unidades de carga se encuentren normalizadas (armonización de sus dimensiones, pesos, etc. en todos los modos implicados).
- Explotación de infraestructuras. La necesidad de un libre acceso a las infraestructuras, separando la gestión de su explotación y garantizando un acceso abierto y no discriminado a la red para los operadores. Así como la necesidad de establecer principios comunes de tarificación e imputación de costes, impuestos y gravámenes.
- Servicios y reglamentos de cada modo. La necesidad de desarrollar tecnologías de información y gestión que proporcionen al usuario final información en tiempo real sobre las posibilidades de transporte intermodal y de la situación de su mercancía, así como de los procedimientos y responsabilidades establecidas en caso de presentarse incidencias.

De entre las señaladas, nuestro trabajo se centra en la necesidad de normalizar las unidades de carga y más en concreto en lograr el mejor aprovechamiento volumétrico de los contenedores, con objeto de reducir el número de fletes a contratar y con ello disminuir costes. Así, en primer lugar se identificarán los requisitos derivados de los estudios de cada modo de transporte que influirán en las condiciones de contorno del sistema de optimización: tipo y forma de los contenedores, limitaciones de peso, tipo de mercancía más habitual, orden de carga/descarga, entre otros. Posteriormente, se estudia la aplicación de heurísticas basadas en inteligencia artificial en el ámbito de optimización de cargas en el llenado de contenedores con objeto de reducir el tiempo de ejecución y desarrollar algoritmos con memoria y capacidad de aprendizaje. Por último, se presentará un avance del algoritmo de optimización y del simulador 3D desarrollado en los diferentes escenarios de llenado de contenedores.

## 2. Revisión de la literatura

Tras el estudio seminal por Gilmore y Gomory (1965), se pueden encontrar una serie de trabajos de investigación encaminados a encontrar una metodología que lleve a una solución óptima para el problema de la carga del contenedor. Algunos trabajos tratan los problemas de *Strip Packing*, *Knapsack Loading*, *Bin Packing* o *Multi-container Loading* (ver Dyckhoff, 1990, para una clasificación general). La inclusión y tratamiento de variables, tales como, dimensiones fijas de los contenedores, homogeneidad de los paquetes que se puedan cargar (en dimensiones, forma, peso, etc.), distribución de pesos dentro del contenedor, estabilidad, fragilidad o costes, pueden diferir de unos trabajos a otros (Gehring and Bortfeldt, 1997; Davies and Bischoff, 1999; Eley, 2002; Bortfeldt and Gehring, 1998, 2001; Terno et al., 2000; Bortfeldt et al., 2003).

Las técnicas utilizadas para estudiar el problema de la carga de contenedores va desde la aplicación de métodos exactos o programación dinámica a métodos heurísticos, incluyendo la *tabu search* (Gendreau et al., 2006; Grainic et al., 2009), *simulated annealing* (Mack et al., 2004; Torra et al., 2010), método GRASP (Parreño et al., 2007), *wall-building* (George and

Robinson, 1980), algoritmos genéticos (Gehring and Bortfeldt, 2002; Gómez and De La Fuente, 2000), etc.

A pesar de la atención recibida, todavía hay una serie de consideraciones de importancia capital para los profesionales que necesitan un mayor desarrollo. Uno de los escenarios que exigen un análisis más profundo es el caso donde la carga enviada consta de objetos con distintos grados de fragilidad y de peso. En la disposición final de carga, será necesario tener en cuenta estas características para garantizar la viabilidad en la práctica de la solución propuesta. Por otro lado, y a pesar de los avances significativos en las últimas décadas, los problemas con formas irregulares en 3 dimensiones no han recibido bastante atención, por lo que hay pocos trabajos en los que las representaciones 3D se utilicen como ayuda en el proceso de carga de contenedor.

### 3. Descripción del Problema

Esta investigación se lleva a cabo bajo el proyecto denominado SITIM, "Análisis, Desarrollo y Evaluación Sistemas Inteligentes de Transporte de Mercancías en un Entorno Intermodal", financiado por el Ministerio de Fomento y cuyo objetivo final es la aplicación de sistemas de transporte inteligentes para el transporte de mercancías en un entorno intermodal, a fin de mejorar la eficacia y la sostenibilidad y aumentar la visibilidad a lo largo de la cadena logística.

Uno de los participantes de SITIM y el principal beneficiario del sistema propuesto es la empresa CEVA LOGISTICS. Este 3PL (proveedor de logística de terceros) es un líder global que trabaja con la mayoría de los principales fabricantes de equipos originales (OEM). La compañía es muy importante en varios sectores entre los que están, automoción, electrónica de alta tecnología, bienes de consumo, etc. La empresa emplea a 54.000 personas y posee una extensa red global con instalaciones en más de 100 países (figura 1).

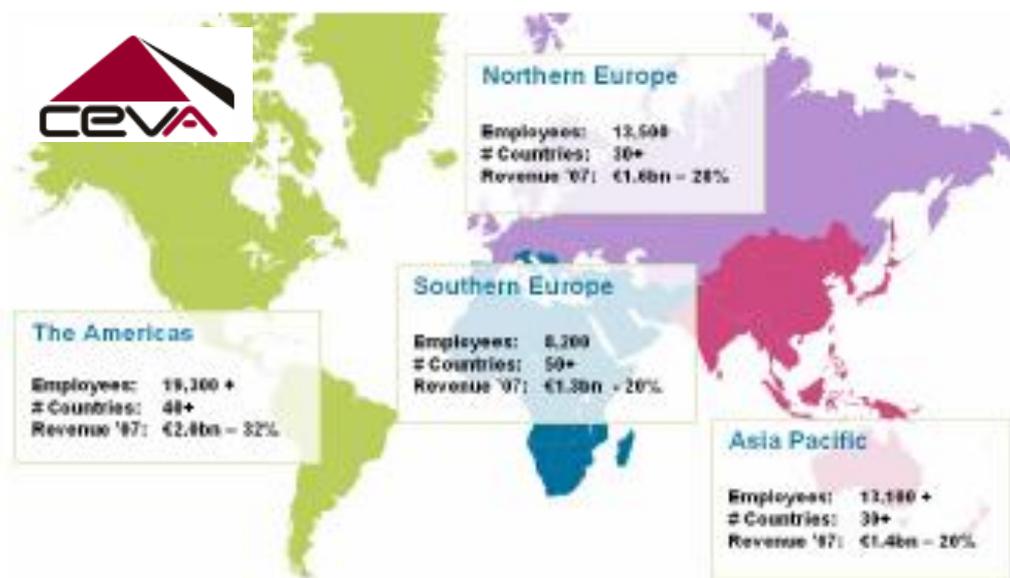


Figura 1. CEVA Logistics en el mundo.

Uno de los principales clientes de CEVA en España es un importante fabricante de automóviles. El sistema se ha orientado a este cliente, incluyendo las características reales de las piezas transportadas con el fin de alcanzar resultados prácticos y realistas. La tabla 1 muestra las características más relevantes de las piezas a ser manipuladas.

**Tabla 1.** Piezas más habituales en el transporte y características de las mismas.

<b>Pieza</b>	<b>Características</b>	<b>Dimensiones Embalaje</b>	<b>Peso Embalaje</b>	<b>Otros Datos</b>
Motores	Pieza costosa y pesada	2270x1170x1270	1000kg.	Embalaje metálico retornable
Cajas de Velocidad	Pieza costosa y pesada	2270x1170x1090	700 Kg.	Embalaje metálico retornable
Piezas Varias	Diversas características	Embalaje estándar	Variable	Embalaje perdido
Piezas Especiales	Frágiles o de geometría especial	Dimensiones especiales	Variable	Embalaje no estándar y con frecuencia no retornable
Piezas en Embalajes Retornables	Diversas características	2270x1170x1270 ó 1090	Variable	Embalaje metálico retornable
Piezas de pequeño tamaño, reagrupadas	Diversas características	Embalaje estándar ó 2270x1170x1270 ó 1090	Variable	Cartón o Embalaje metálico retornable
Cajas pequeñas a introducir en otros embalajes	Diversas características	Pequeño tamaño	Variable	Dentro de un embalaje metálico ya contabilizado

**MOTORES.** Son piezas muy pesadas y de elevado coste. Para su transporte se utilizan embalajes metálicos retornables, con un peso total de 1000 kg.

**CAJAS DE VELOCIDAD.** Igual que los motores, son elementos pesados y de elevado coste. También se transportan en embalajes metálicos pero con un peso total inferior, 700 kg.

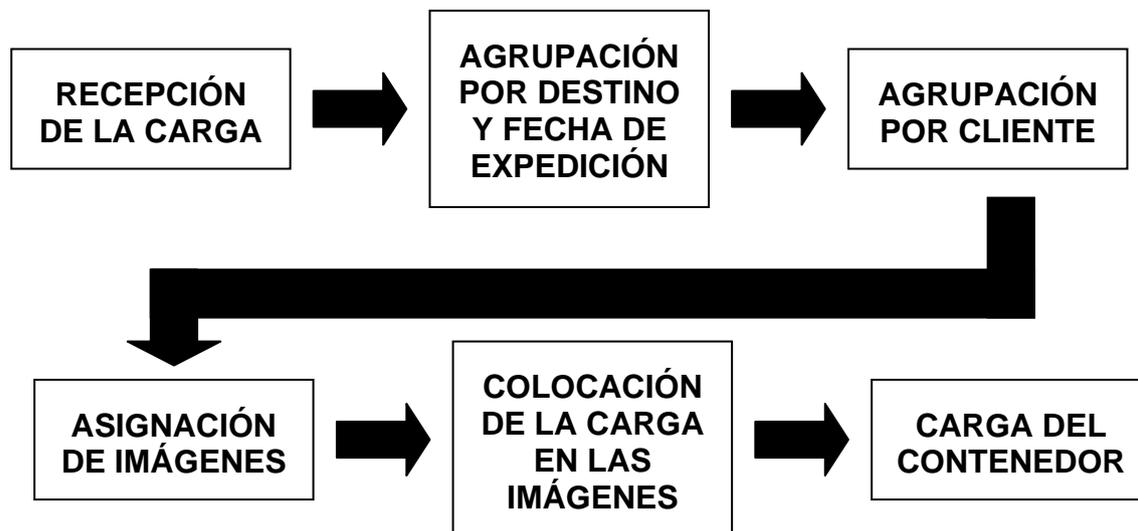
**PIEZAS VARIAS.** En esta categoría se incluyen la mayoría de las piezas transportadas, con multitud de referencias y características. Se suelen transportar en embalajes de dimensiones estándar y no retornables.

**PIEZAS ESPECIALES.** Piezas que no utilizan embalajes de dimensiones estándar, generalmente no retornables. Por su geometría especial (o la fragilidad de la mercancía), es necesario prestar una especial atención a la hora de ubicar estos embalajes en el contenedor.

**PIEZAS EN EMBALAJES RETORNABLES.** La tendencia actual es que las piezas de elevado valor o importancia estratégica se transporten en contenedores metálicos retornables. Por razones de seguridad y porque al ser retornables causan un menor impacto ecológico.

**PIEZAS DE PEQUEÑO TAMAÑO REAGRUPADAS EN EMBALAJES MAYORES.** Las pequeñas piezas se transportan en pequeños embalajes (cajas de cartón) que a su vez son reagrupadas en embalajes de mayor tamaño, retornables (metálicos) o no.

**CAJAS PEQUEÑAS EN EMBALAJES SEMIVACIOS.** En algunos casos, los embalajes metálicos no están completamente llenos por lo que se introduce en ellos cajas pequeñas con piezas de pequeño peso.



**Figura 2.** Proceso actual de carga de contenedores.

El proceso habitual de carga de contenedores (figura 2), comienza con la recepción del material a transportar que ha sido previamente embalado utilizando los embalajes correspondientes: metálicos retornables, no retornables, etc. A medida que se va recibiendo la mercancía, se generan las etiquetas de expedición correspondientes, con las que se identificarán los embalajes (contenido, fecha de recepción, fecha de expedición, cliente y destino).

Se hace una primera agrupación por destino y fecha de expedición, y posteriormente una segunda agrupación por cliente. Si el volumen a transportar para cada cliente es suficiente como para llenar uno o varios contenedores, se hará una asignación de contenedores por cliente, pero si no fuera así se podrán asignar contenedores multicliente, siempre y cuando el destino sea el mismo.

Con el objetivo de reducir el tiempo de carga y optimizar la ubicación de los embalajes en el contenedor, se confecciona una “imagen” del contenedor: se marca una zona que tiene las dimensiones exactas de la base del contenedor, y se utiliza un listón que fija la altura del contenedor.

A partir de esto, el operario va llenando la “imagen” con los distintos embalajes, de la misma forma que llenaría el contenedor real. Esta tarea será realizada basándose en su experiencia y cumpliendo las restricciones existentes en cuanto a altura máxima permitida, distribución de pesos, apilamientos de embalajes, etc. Estas restricciones se pueden resumir en los criterios siguientes:

1.- Peso máximo del contenedor y equilibrado de cargas. El peso máximo permitido en un contenedor High Cube (40 pies) es de 26460kg. y deberá estar distribuido por todo el contenedor.

2.- Apilado de embalajes.

a) Según la altura del contenedor, se podrán apilar los embalajes en 2, 3 o 4 niveles.

b) Peso de embalajes. Existe una codificación de los embalajes según su peso:

H – peso < 250 kg.

M – peso entre 250 y 500 kg

B – peso > 500 kg.

Los embalajes B se colocarán en la base del contenedor, sobre estos se colocarán los embalajes M y los H irán situados en la parte superior del contenedor. En la tabla 2, se muestran algunos ejemplos de apilamientos permitidos y no permitidos.

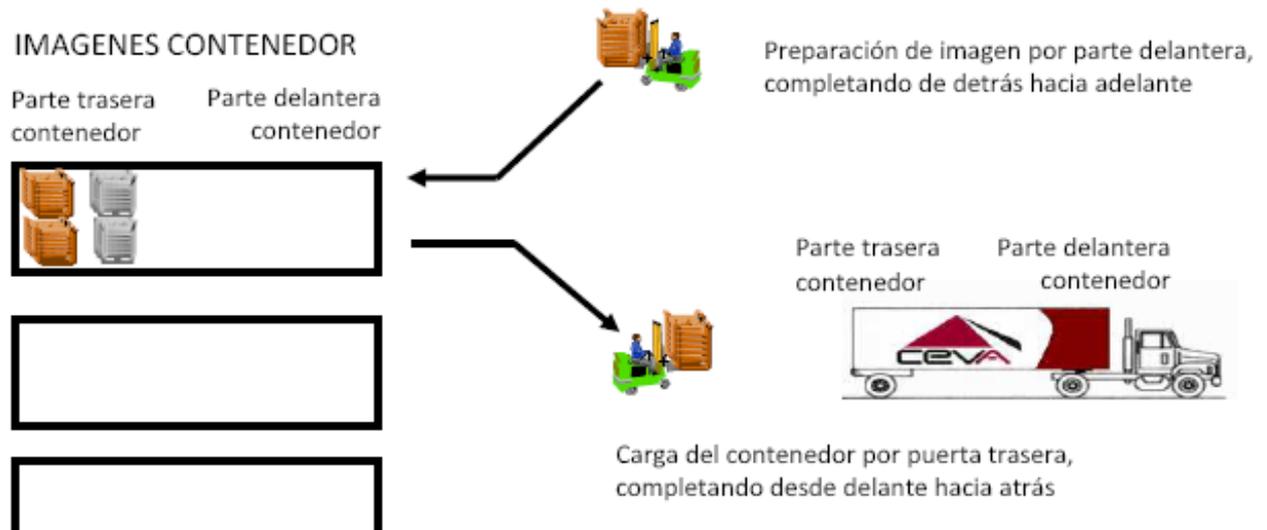
**Tabla 2.** Ejemplos de apilamientos permitidos o no permitidos.

Superior	H	M	H	B	H	M	H	B	M	B
Medio	M	H	B	H	H	M	B	H	B	M
Inferior	B	B	B	B	M	M	M	M	H	H
<b>Permitido?</b>	Si	No	Analizar carga central	No	Si	Si, analizar cargas central y superior	No	No	No	No

c) Peso acumulado del apilamiento. Cada embalaje soportará un peso máximo de 750 kg.

d) Fragilidad de las piezas. Se ubicarán en la parte superior.

e) Llenado del embalaje. Si el embalaje no estuviera completamente lleno, se colocará en posiciones superiores.



**Figura 3.** Proceso de llenado de imágenes y de contenedores.

En la formación de las imágenes, se van completando desde la parte trasera hacia adelante, puesto que los contenedores se cargarán introduciendo la carga por la puerta trasera. Por tanto los primeros embalajes que deben entrar en el contenedor serán los que ocuparán la parte delantera; estos embalajes deben ser los últimos que se han colocado en la imagen (figura 3). Por último, una vez completadas las imágenes, se efectúa la carga del contenedor real.

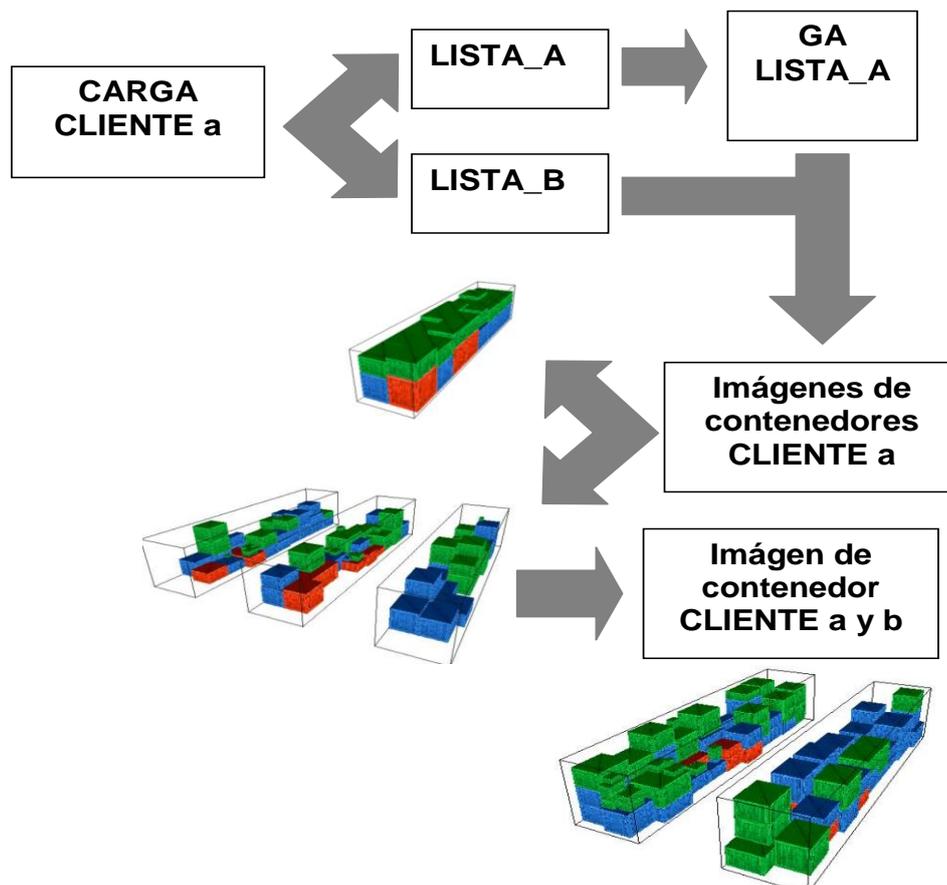
Nuestra aportación principal consiste en el desarrollo de un programa informático, basado en Algoritmos Genéticos, que ayuda en el proceso de preparación de las imágenes. En la actualidad, este proceso se lleva a cabo de manera manual, basándose en los conocimientos y

sobre todo en la experiencia de los operarios encargados del proceso. El objetivo de CEVA es llegar a una ocupación mínima de  $65\text{m}^3$  en un contenedor High Cube lo que supone ocupar el 85% del volumen total del contenedor.

#### 4. Descripción de la solución propuesta

Nuestra solución parte del momento en el que se han hecho las agrupaciones, por destino, por fecha de expedición y por cliente. Por lo tanto, la situación inicial es que tenemos un número de embalajes (en un caso general de dimensiones y pesos distintos) con el mismo destino, fecha de expedición y cliente, que debemos cargar en el número mínimo de contenedores.

El proceso se puede resumir en cuatro etapas (figura 4):



**Figura 4.** Método propuesto.

1.- Se hace una separación entre los embalajes más voluminosos y pesados (que se deberán colocar preferentemente en la base del contenedor) y que llamaremos LISTA\_A; y la LISTA\_B que estará formada por embalajes más pequeños y ligeros, que serán utilizados para cubrir los huecos generados por la colocación de los embalajes de la LISTA\_A en el contenedor.

2.- Un algoritmo genético calculará la secuencia de introducción de embalajes de la LISTA\_A en el contenedor. El procedimiento está basado en Gómez y De La Fuente, 2000; para ello, se genera una población inicial de individuos (secuencias), de manera aleatoria o bien haciendo apilamientos de embalajes de las mismas características. Aplicando los operadores habituales

de “reproducción”, “cruce”, “mutación” y “reemplazo”, la solución evolucionará intentado optimizar la función de “fitness” en la que se han introducido todas las restricciones anteriormente comentadas: peso final del contenedor, equilibrado de pesos, apilamientos permitidos, etc.

3.- Una vez ocupada la base del contenedor, se intenta cubrir los huecos (si los hubiera), utilizando los embalajes de la LISTA\_B. Estos embalajes son más pequeños y ligeros, sin embargo, el algoritmo intentará no desequilibrar demasiado la distribución de pesos del contenedor. La metodología en esta fase se basa en los trabajos de Martello et al., 2000, combinados con Huang and He, 2009.

4.- Por último, en el caso de que un contenedor quede con una ocupación muy baja, se intentará crear un contenedor multicliente, siempre y cuando el destino de todos los envíos sea el mismo. De esta forma, un ejemplo de solución final podría estar formada por 2 contenedores para el cliente “a”, 3 contenedores para el “b”, y 1 contenedor formado por envíos para los clientes “a” y “b”.

Como ejemplos de la aplicación de la metodología propuesta, presentamos dos casos.

#### **4.1. Ejemplo 1**

El primer caso pretende ser un ejemplo de la situación actual, en la que para conseguir un aprovechamiento máximo del contenedor, se preparan envíos muy homogéneos, es decir, muy pocos tamaños de embalajes (3 ó 4). En nuestro caso, se ha generado un envío compuesto por:

8 embalajes F3 (H) (750x500x500 mm)  
30 embalajes 3G (H) (1450x1140x850 mm)  
20 embalajes M4 (M) (1460x1140x1360 mm)  
12 embalajes O3 (B) (1460x1140x1600 mm)

En este caso, la solución alcanzada es la que se muestra en la figura 5. Corresponde a un único contenedor casi lleno, la ocupación es del 80% del volumen.

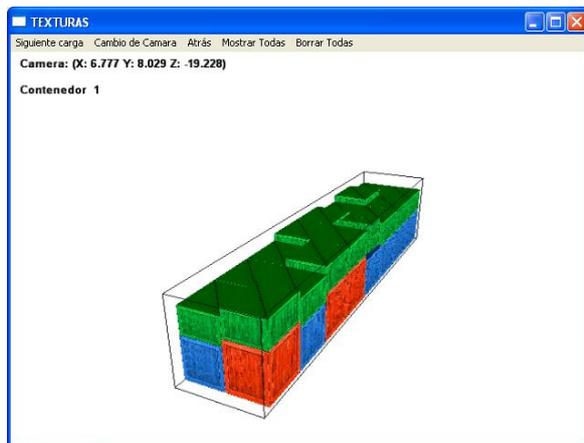
#### **4.2. Ejemplo 2**

El segundo ejemplo, es un caso mucho más general, en el que se ha generado un envío compuesto por 100 embalajes, pero en este caso de dimensiones y pesos muy distintos:

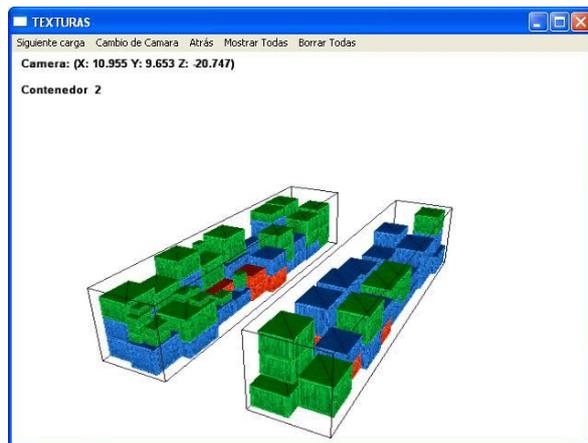
50 embalajes H (8 tamaños distintos)  
40 embalajes M (12 tamaños distintos)  
10 embalajes B (4 tamaños distintos)

La solución mostrada en la figura, es claramente inferior al caso anterior, ya que se utilizarán dos contenedores en los que se ocupará en torno al 60 % de volumen. Esto es debido a que este problema es mucho más difícil de resolver que el primero, ya que se deben colocar 24 tipos de embalajes en lugar de los 4 del primer caso, y para cumplir las restricciones de equilibrado de pesos y apilamientos, la solución no puede ser tan compacta como en el primer caso.

De todos modos, esta solución podría mejorarse, si fuera posible combinar el envío al cliente “a” con un envío a otro cliente “b”, con el mismo destino, formándose contenedores multicliente.



**Figura 5.** Solución ejemplo 1.



**Figura 6.** Solución ejemplo 2

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha hecho un análisis de las razones por las que el transporte multimodal no está teniendo el desarrollo esperado, a pesar de las innegables ventajas que presenta desde el punto de vista de ahorro de costes, de mejor aprovechamiento de la energía etc.

Después del estudio realizado en colaboración con la empresa CEVA Logistics, se ha llegado a la conclusión de que uno de los principales problemas es la falta de las infraestructuras adecuadas, los problemas en la explotación de las existentes y la falta de uniformidad en la reglamentación de cada modo de transporte.

Con nuestro trabajo, queremos contribuir al logro de un mejor aprovechamiento de los contenedores, con el objetivo de reducir el número de fletes a contratar y con ello disminuir los costes. Presentamos una metodología que utiliza la herramienta de algoritmos genéticos para establecer cuál debe ser la secuencia de llenado y colocación de los embalajes en los contenedores, cumpliendo numerosas restricciones relativas al equilibrado de pesos, apilamiento de embalajes, etc.

## Referencias

- Bortfeldt, A. and Gehring, H. (1998): "Ein Tabu Search-Verfahren für Containerbeladeprobleme mit schwach heterogenem Kistenvorrat". *OR Spectrum*, Vol. 20 (4), pp. 237-250
- Bortfeldt, A. and Gehring, H. (2001): "A hybrid genetic algorithm for the container loading problem". *European Journal of Operational Research*, Vol. 131 (1), pp. 143-161.
- Bortfeldt, A.; Gehring, H. and Mack, D. (2003): "A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem". *Parallel Computing*, Vol. 29 (5), pp. 641-662.
- Davies, P.A. and Bischoff, E.E. (1999): "Weight distribution considerations in container loading". *European Journal of Operational Research*, Vol. 114 (3), pp. 509-527.
- Dyckhoff, H. (1990): "A typology of cutting and packing problems". *European Journal of Operational Research*, Vol. 44 (2), pp. 145-159.
- Eley, M. (2002): "Solving container loading problems by block arrangement". *European Journal of Operational Research*, Vol. 141 (2), pp. 393-409.

- Gehring, H. and Bortfeldt, A. (1997): "A genetic algorithm for solving the container loading problem". *International Transactions in Operational Research*, Vol. 4 (5-6), pp.401-418.
- Gehring, H. and Bortfeldt, A. (2002): "A Parallel Genetic Algorithm for Solving the Container Loading Problem". *International Transactions in Operational Research*, Vol. 9 (4), pp. 497-511.
- Gendreau, M.; Iori, M.; Laporte, G. and Martello, S. (2006): "A Tabu Search Algorithm for a Routing and Container Loading Problem". *Transportation Science*, Vol. 40 (3), pp. 342–350.
- George, J.A. and Robinson, D.F. (1980): "A Heuristic for Packing Boxes into a Container". *Computers and Operations Research*, Vol. 7, pp. 147-156.
- Gilmore, P.C. and Gomory, R.E. (1965): "Multistage Cutting Stock Problems of Two and More Dimensions". *Operations Research*, Vol. 13 (1), pp. 94-120.
- Gómez, A. and De La Fuente, D. (2000): "Resolution of strip-packing problems with genetic algorithms". *International Journal of Operational Research*, Vol. 51 (11), pp. 1289-1295.
- Grainic, T.G.; Perboli, G. and Tadei, R. (2009): "TS<sup>2</sup>PACK: A two-level tabu search for the three-dimensional bin packing problem". *European Journal of Operational Research*, Vol. 195 (3), pp. 744-760.
- Huang, W. and He, K. (2009): "A caving degree approach for the single container loading problem". *European Journal of Operational Research*, Vol. 196 (1), pp. 93-101.
- Mack, D.; Bortfeldt, A. and Gehring, H. (2004): "A parallel hybrid local search algorithm for the container loading problem". *International Transactions in Operational Research*, Vol. 11 (5), pp. 511-533.
- Martello, S.; Pisinger, D. and Vigo, D. (2000): "The Three-Dimensional Bin Packing Problem". *Operations Research*, Vol. 48 (2), pp. 256-267.
- Parreño, F.; Alvarez-Valdes, R.; Oliveira, J.F. and Tamarit, J.M. (2007): "A maximal-space algorithm for the container loading problem". *INFORMS Journal. on Computing*, (in press)
- Terno, J.; Scheithauer, G.; Sommerwe, U. and Riehme, J. (2000): "An efficient approach for the multi-pallet loading problem". *European Journal of Operational Research*, Vol. 123 (1), pp 372-381.
- Torra, V.; Cano, I.; Miyamoto, S. and Endo, Y. (2010): "Container loading for nonorthogonal objects: an approximation using local search and simulated annealing". *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies & Applications*, Vol. 14 (5), pp. 537-544.