

SISTEMAS INTELIGENTES PARA EL DISEÑO DE EMPAQUETADOS. MODELOS Y APLICACIONES EN EMPRESAS DE ALMACENAJE Y TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

***Jesús David Beltrán Cano¹, Jose Eduardo Calderón¹, José Víctor García¹,
Rayco Jorge Cabrera², José A. Moreno³, J. Marcos Moreno Vega⁴***

¹Ingeniero en Informática

²Ingeniero Técnico en Informática de Gestión

³Catedrático de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial

⁴Profesor Titular de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de La Laguna

20 de Enero de 2005

INTRODUCCIÓN

En la gestión diaria de Empresas de Almacenaje y Transporte de Mercancías aparecen problemas de los conocidos como problemas de empaquetado. La correcta distribución de mercancías en un almacén hace que éste pueda gestionarse mejor; colocar apropiadamente las mercancías en camiones de distribución minimiza el número de camiones necesarios; dimensionar de forma correcta un nuevo almacén minimiza costes; gestionar de forma apropiada las estanterías de un almacén aumenta los beneficios.

En el presente capítulo se definen algunos de estos problemas, se enumeran aplicaciones de los mismos y se describe el Sistema Inteligente para el Diseño de Empaquetados que ha sido propuesto, implementado y validado por el Grupo de Computación Inteligente de la Universidad de La Laguna. Una descripción detallada de los fundamentos del sistema puede encontrarse en [BEL02a] [BEL02b] [BEL02c] [BEL04a] y [BEL04b].

PROBLEMAS DE EMPAQUETADO

Los problemas de empaquetado constituyen una amplia clase de problemas en los que, de forma general, se desea empaquetar un conjunto de items (figuras geométricas pequeñas) en un objeto geométrico mayor (o conjunto de objetos) de tal forma que se optimice algún objetivo relativo al empaquetado obtenido. Las situaciones reales en las que aparecen este tipo de problemas son muchas y variadas. A continuación se enumeran algunas de las aplicaciones directas de estos problemas en la Industria Textil y en Empresas de Almacenaje y Transporte de Mercancías.

- Industria textil: se desea empaquetar el conjunto de piezas necesarias para confeccionar un vestido en un rollo de tela, de tal forma que se emplee la menor cantidad de ésta.
- Carga de contenedores: se desea determinar el menor número de contenedores que son necesarios para embalar un conjunto de cajas.
- Empresas de transporte: encontrar el menor número de camiones que hacen falta para transportar un conjunto de mercancías.
- Empresas de almacenaje de mercancías: encontrar la mejor forma de distribuir un conjunto de contenedores en un almacén dado.

La importancia de estos problemas en procesos industriales o de gestión financiera se refleja en la gran cantidad de trabajos aparecidos en la literatura científica. Algunos trabajos de revisión y clasificación en los que también se enumeran aplicaciones son [DOW92], [DYC90], [DYC92] y [HOP01].

Strip Packing Problem

Uno de los problemas más importantes en la industria textil es el de determinar el patrón de corte con que obtener las piezas necesarias para confeccionar la ropa. El patrón de corte determina la posición de cada pieza en el rollo rectangular de tela. El objetivo es obtener la distribución que usa menos tela. Aunque las piezas requeridas para la confección son irregulares, para abordar el problema se considera el menor rectángulo que contiene a cada pieza y entonces se determina el mejor patrón de corte para los rectángulos. Este último problema es conocido como Strip Packing Problem.

En el Strip Packing Problem, dado un objeto rectangular de amplitud fija w y altura indeterminada, y un conjunto, R , de rectángulos con al menos uno de sus lados menor que w , se desea empaquetar el conjunto R en el objeto rectangular utilizando el menor espacio

posible (o lo que es lo mismo, se pretende minimizar la altura del empaquetado). En la figura 1 se muestra una distribución de cuatro rectángulos en un objeto rectangular de amplitud w . Aunque la aplicación más directa de este problema está en la Industria Textil o del Calzado, existen otras relacionadas con la gestión de Empresas de Almacenaje y Distribución de Mercancías. Existen mercancías que, por su fragilidad, no pueden ser apiladas. Conocido el ancho del almacén, para minimizar el espacio usado del mismo debe resolverse un Strip Packing Problem donde cada rectángulo representa la base de las cajas a colocar.

Three-Dimensional Bin Packing Problem

El problema del empaquetado en tres dimensiones (Three Dimensional Bin Packing Problem) se formula como sigue. Dado un conjunto R de n cajas, con forma rectangular, y un número ilimitado de contenedores idénticos, también con forma rectangular, determinar el menor número de contenedores que son necesarios para empaquetar todas las cajas (en la figura 1 se muestra un posible empaquetado para un contenedor). Adicionalmente, se pueden imponer algunas restricciones que pueden atender a razones estructurales o físicas. Algunas de las restricciones habituales en aplicaciones reales son:

- Tiene que respetarse la orientación inicial de las cajas. Es decir, no se permiten rotaciones en ninguno de los ejes.
- El patrón de empaquetado tiene que ser guillotina. Es decir, una vez empaquetadas las cajas en los contenedores, éstas deben poder separarse por medio de cortes tipo guillotina (cortes paralelos a los ejes del contenedor que atraviesen al mismo de un lado a otro).
- Para que una solución sea factible, todas las cajas deben tener la totalidad de su base apoyada sobre otra caja o sobre el suelo del contenedor.

Estas u otras restricciones deben ser respetadas por cualquier sistema que pretenda resolver el problema. No obstante, esto no es tarea fácil en muchos casos, ya que los métodos de solución conocidos no son capaces de contemplarlas. La alternativa adoptada por tales métodos consiste en relajar estas restricciones y resolver el problema que se obtiene. Sin embargo, las soluciones obtenidas pueden no ser las mejores para el problema original.

SISTEMA INTELIGENTE DE CORTE

En lo que sigue se describe el diseño, implementación y evaluación práctica de nuestro Sistema Inteligente para el Diseño de Empaquetados. Dado un conjunto de piezas, un patrón determina la posición de éstas en el objeto. El objetivo es obtener la distribución que emplea

menos material, usa un menor número de contenedores o alcanza de la mejor manera posible un objetivo determinado.

Nuestro sistema está formado por cuatro módulos, cada uno de los cuales tiene un cometido en la resolución práctica del problema. El sistema realiza una búsqueda inteligente sobre el conjunto de todos los patrones posibles, y devuelve uno que satisface al usuario. Por inteligente entendemos que el sistema es eficiente (consume poco tiempo), eficaz (devuelve patrones óptimos o cercanos al óptimo en la experiencia computacional desarrollada), finaliza la búsqueda cuando existe evidencia de que el mejor patrón encontrado es difícilmente mejorable y emplea conocimiento experto de la persona encargada de diseñar los patrones de corte.

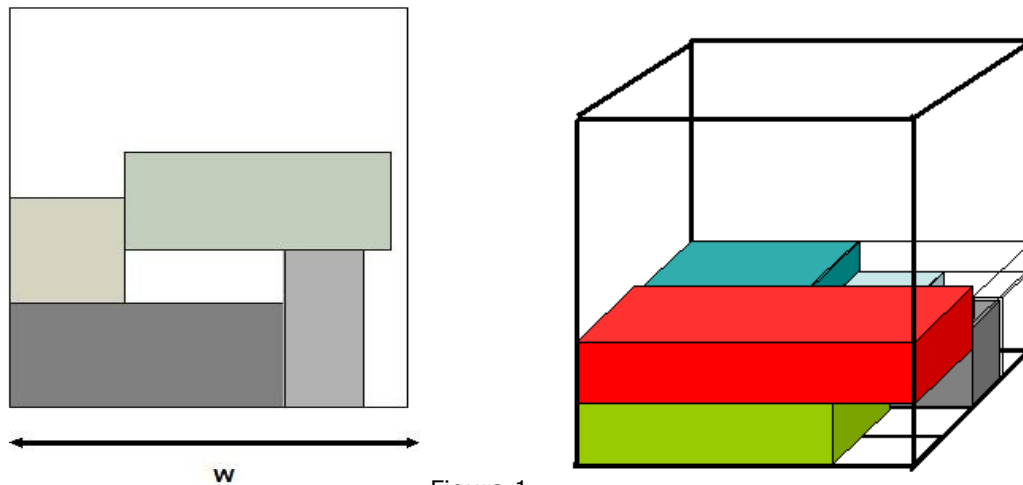


Figura 1.

Los módulos del sistema inteligente de corte son:

- Módulo de Búsqueda: es el núcleo del sistema. Se encarga de realizar la búsqueda de un patrón satisfactorio para el usuario. Las salidas de este módulo irán al Módulo de verificación de soluciones y finalización.

- **Módulo de Verificación de Soluciones y Finalización:** Evaluando la calidad de los patrones de corte encontrados hasta el momento por el Módulo de Búsqueda, el mejor patrón que teóricamente puede obtenerse, y la cantidad de recursos empleados, determina si el patrón encontrado reúne características suficientes para considerarlo satisfactorio para el usuario. Si la respuesta es afirmativa, finaliza el proceso.
- **Módulo de Interacción:** Es el encargado de interactuar con el experto para obtener el conocimiento que puede mejorar el rendimiento de la búsqueda.
- **Módulo Gráfico de Presentación:** Interfaz para la recogida de datos y presentación de soluciones al usuario.

En la figura 2 se muestra la estructura del sistema. El Módulo de Búsqueda construye un patrón de empaquetado o corte siguiendo reglas inteligentes (fase constructiva). Este patrón es mejorado aplicando métodos de mejora inteligentes que tienen en cuenta la distribución de los ítems (postprocesamiento). Este nuevo patrón es evaluado por el Módulo de Verificación y Terminación que determina si la calidad del mismo es suficiente. En caso afirmativo, el patrón se envía al Módulo Gráfico de Presentación que lo muestra al usuario. Si la calidad del patrón no satisface al usuario, se construye un nuevo patrón y se repiten los pasos previos. Por su parte, el Módulo de Interacción se emplea para que el usuario interactúe con el sistema, suministrando reglas de construcción de patrones o de mejora de los mismos que puedan usarse en el Módulo de Búsqueda, o indicando criterios con los que determinar si un patrón es de alta calidad en el Módulo de Verificación y Terminación.

Módulo de Búsqueda

Es el núcleo del sistema. Se han diseñado, implementado y validado diferentes estrategias para la obtención eficaz y eficiente de patrones de empaquetado que satisfagan al usuario. Las estrategias contempladas en el estudio pertenecen a la clase de los Métodos Metaheurísticos. Las Metaheurísticas son procedimientos de resolución de problemas que emplean reglas para dirigir la búsqueda sobre el conjunto de alternativas posibles de un problema. Tras una fase experimental en la que se compararon entre sí diferentes Metaheurísticas se obtuvo que la mejor estrategia para resolver este tipo de problemas es GRASP.

GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) [FE095] es un procedimiento heurístico constructivo que consta de dos etapas. A una fase constructiva, en la que se escoge iterativamente y al azar un elemento de la lista restringida de candidatos

(subconjunto de los mejores elementos no presentes en la solución), le sigue una fase de postprocesamiento en la que se mejora la solución obtenida en la fase anterior.

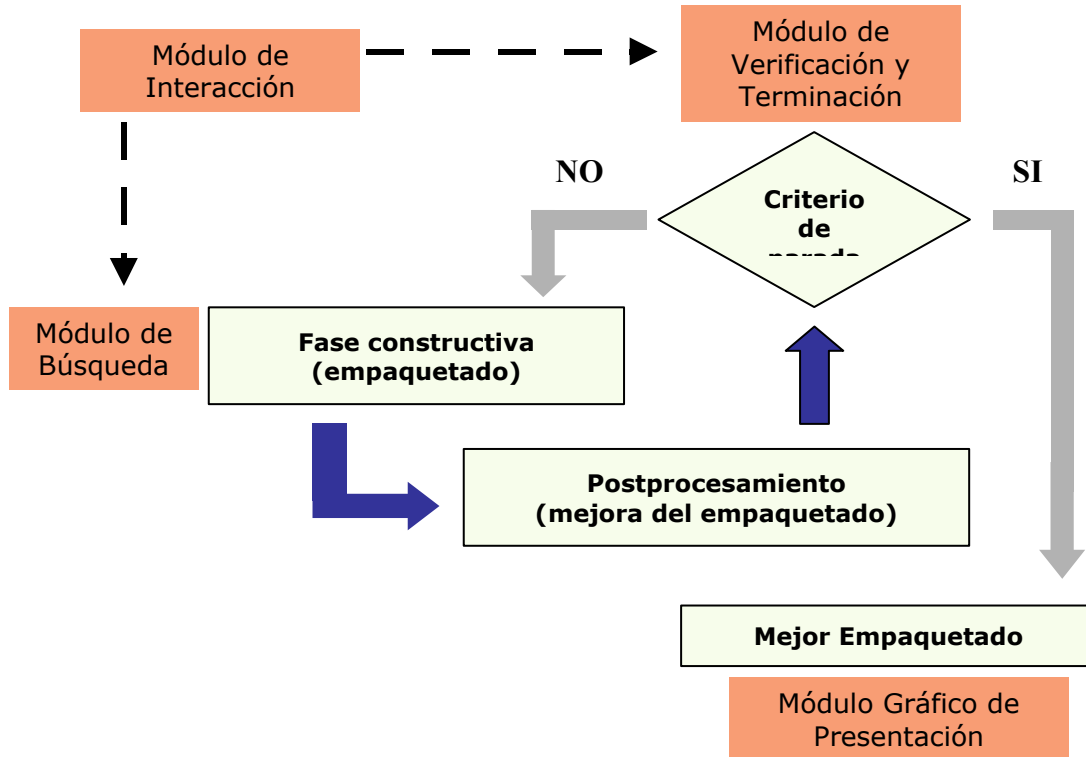


Figura 2. Sistema Inteligente de Corte

Aplicado al Strip Packing Problem (una estrategia similar se emplea para el Three-Dimensional Bin Packing Problem), la fase constructiva se implementa como sigue. En cada iteración, la lista restringida de candidatos se construye con los k rectángulos que mejor se

ajustan al nivel más profundo de la tela (el nivel más profundo es aquel en el que aún pueden colocarse rectángulos). A continuación, se selecciona al azar uno de estos rectángulos y se coloca en la tela. Se actualiza el nivel más profundo y se vuelve a construir la lista restringida de candidatos. Estos pasos se reiteran hasta que se hayan colocado todos los rectángulos. De esta forma se obtiene una solución del problema.

La fase constructiva que se emplea en esta particular implementación de GRASP para el Strip Packing Problem recuerda a la seguida al jugar al TETRIS (colocar el rectángulo que va apareciendo en la posición más profunda).

Experimentalmente se ha comprobado que la anterior fase constructiva suministra soluciones de alta calidad que, sin embargo, pueden mejorarse recolocando apropiadamente los últimos rectángulos introducidos en la tela. La fase de postprocesamiento de nuestro sistema determina inteligentemente qué rectángulos deben ser recolocados y cómo hacerlo.

Módulo de Verificación y Terminación

Para un experto, es relativamente sencillo determinar si una solución de un problema de empaquetado puede mejorarse o no de forma eficiente. Esto es así, ya que, además del valor de las soluciones, analiza otras características de la solución como: área o volumen de los desperdicios, distribución de los rectángulos en la tela, colocación de las cajas en el contenedor o camión, etc.

Esta información puede emplearse en un procedimiento de resolución de problemas para desarrollar reglas de parada apropiadas para el mismo. Las reglas de parada que se usan en nuestro sistema de empaquetado emplean el valor de varios parámetros que caracterizan la bondad de una solución. El valor alcanzado en una solución del problema se compara con el valor que se considera deseable. Es decir, con el valor que satisface al decisor o que caracteriza una situación no mejorable eficientemente. El resultado de esta comparación indica si se debe continuar o no la búsqueda de nuevos patrones de empaquetado. El Módulo de Verificación y Terminación es el encargado de realizar estas operaciones.

Módulo de Interacción

Proporciona las herramientas necesarias para que el decisor interactúe con el sistema. La interacción puede darse a diferentes niveles y en diferentes etapas del proceso de resolución del problema. Así, el decisor puede indicar qué es para él un patrón difícilmente mejorable o suministrar reglas con las que construir patrones de calidad. La principal dificultad está en

cómo representar este conocimiento experto para que pueda usarse en un programa informático que resuelva el problema. Nosotros hemos usado diferentes herramientas entre las que destaca el uso de la Teoría de los Conjuntos Difusos.

Módulo Gráfico de Presentación

El Módulo Gráfico de Presentación es el encargado de presentar, entre otras cosas, el mejor patrón encontrado por el Módulo de Búsqueda. Además, suministra información acerca del tiempo invertido, cantidad de desperdicio o número de iteraciones desarrolladas. Esta información sirve para monitorizar, en parte, el proceso de búsqueda. De esta forma, el decisor dispone de una herramienta que puede usar para tomar mejores decisiones.

ALGUNOS RESULTADOS

Hemos validado nuestro Sistema Inteligente para el Diseño de Empaquetados sobre instancias de los dos problemas enumerados en el presente trabajo: Strip Packing Problem y Three-Dimensional Bin Packing Problem. Los resultados obtenidos han sido excelentes para el Strip Packing Problem y muy prometedores para el Three-Dimensional Bin Packing. La tabla 1 muestra algunos de los resultados obtenidos con instancias del Strip Packing Problem. Las dos primeras columnas de la tabla dan el número de rectángulos y el ancho de la tela. La tercera columna muestra el valor objetivo de la mejor solución (altura del empaquetado). El resto de columnas suministra el valor objetivo de la mejor solución obtenida por el Sistema Inteligente y el tiempo en segundos que consumió el sistema.

Lo primero que se observa de los resultados mostrado es que el sistema es altamente eficaz (suministra soluciones de alta calidad, es decir, cercanas a la mejor solución del problema) y eficiente (los tiempos consumidos son muy bajos). Resaltar que para problemas más pequeños, la mejor técnica conocida hasta que diseñamos nuestro Sistema Inteligente consumía casi 2 días de cómputo para dar solución a dichos problemas.

CONCLUSIONES

Muchos de los problemas que aparecen en empresas de almacenaje y transporte de mercancías pertenecen a la clase de los problemas de empaquetado. La correcta resolución de éstos puede suponer un ahorro económico importante. Hemos presentado un Sistema Inteligente para el Diseño de Empaquetados que encuentra patrones de empaquetado de alta calidad en un tiempo razonable. El Sistema se ha validado con instancias del Strip Packing Problem y del Three-Dimensional Bin Packing Problem. Sin embargo, las ideas

utilizadas para implementar los Módulos de Búsqueda, y Verificación y Terminación son aplicables, con pequeñas modificaciones, a otros problemas de empaquetado. Actualmente, trabajamos en esta línea.

<i>n</i>	<i>w</i>	<i>Valor óptimo</i>	<i>Valor obtenido por el Sistema Inteligente</i>	<i>Tiempo</i>
50	50	50	51	3.262
50	40	60	61.5	27.885
100	50	50	51	1.663
100	50	75	76	4.987
200	100	100	101	1.432
200	120	160	162	6.052
500	100	200	202.2	3.410
500	150	200	202	8.552

Tabla 1. Resultados obtenidos con el Sistema Inteligente para el Strip Packing Problem

BIBLIOGRAFÍA

[BEL02a] Jesús David Beltrán, Jose Eduardo Calderón, Rayco Jorge Cabrera, J. Marcos Moreno Vega. *Procedimientos constructivos adaptativos (GRASP) para el problema del empaquetado bidimensional. Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 15 (2002) pp. 26-33

[BEL02b] Jesús David Beltrán Cano, Jose Eduardo Calderón, Rayco Jorge Cabrera, J. Marcos Moreno Vega. *Fase de postprocesamiento de una Búsqueda Constructiva Adaptativa (GRASP)*. Actas de la VIII Conferencia Iberoamericana de Inteligencia Artificial. IBERAMIA (2002) pp. 97-106

[BEL02c] Jesús David Beltrán Cano, Jose Eduardo Calderón, Rayco Jorge Cabrera, J. Marcos Moreno Vega. *Reglas de parada para el problema del empaquetado rectangular bidimensional no guillotina*. Actas de la VIII Conferencia Iberoamericana de Inteligencia Artificial. IBERAMIA (2002) pp. 107-116

- [BEL04a]** Jesús David Beltrán, José Eduardo Calderón, Rayco Jorge Cabrera, José A. Moreno Pérez, J. Marcos Moreno-Vega. *Fuzzy Stopping Rules for the Strip Packing Problem*. IPMU 2004, Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems, Perugia, Italia (2004)
- [BEL04b]** Jesús David Beltrán, Jose Eduardo Calderón, Rayco Jorge Cabrera, José A. Moreno Pérez, J. Marcos Moreno-Vega. *GRASP-VNS hybrid for the Strip Packing Problem*. First International Workshop in Hybrid Metaheuristics at ECCAI 2004, Valencia (España), 2004.
- [DOW92]** K.A. Dowsland, W.B. Dowsland. *Packing Problems*. European Journal of Operational Research 56 (1992) pp. 2-14
- [DYC90]** H. Dyckhoff. *Typology of Cutting and Packing Problems*. European Journal of Operational Research 44 (1990) pp. 145-159
- [DYC92]** H. Dyckhoff, U. Finke. *Cutting and Packing in Production and Distribution*. Springer Verlag, Berlin (1992)
- [FEO95]** T. A. Feo, M.G.C. Resende. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 6 (1995) pp. 109-133
- [HOP01]** E. Hopper, B.C.H. Turton. *A Review of the Application of Meta-Heuristics Algorithms to 2D Strip Packing Problems*. *Artificial Intelligence Review* 16 (2001) pp. 257-300

TÍTULO (Verdana 12, mayús., negrita, justif. dcha.)

Nombre y apellidos (verdana 10, negrita, justif. derecha)

Cargo (verdana 10, normal, justif. derecha)

Fecha de elaboración documento (verdana 10, normal, justif. dcha.)

CAPÍTULOS -Verdana 10, mayús., negrita, justif. izda., color (170 matiz, 255 saturación y 64 luminosidad)-

Párrafos -verdana 9, normal, justificación completa sin sangrado, interlineado sencillo (1ª letra 1º párrafo verdana 12 negrita)-

Apartados (Verdana 10, negrita, justif. izda.)

Párrafos -verdana 9, normal, justificación completa sin sangrado, interlineado sencillo (1ª letra 1º párrafo verdana 12 negrita)-

Subapartados (Verdana 10, negrita cursiva, justif. izda.)

MÁRGENES: Superior 3 cm. , izquierdo 3 cm., derecho 3 cm. e inferior 4 cm.

GRÁFICOS: Blanco y negro, 300 pp de resolución (formato jpeg).

TABLAS: Blanco y negro.

VIÑETAS: Se utilizará, en caso necesario el siguiente modelo de viñeta para diferenciar párrafos, lo cuáles deberán ir sangrados (1 cm.) para individualizarlos del resto "■".

-Se puede utilizar color gris para dar color y/o sombrear algunas tablas y gráficos de Microsoft Excell (170 matiz, 0 saturación y 221 luminosidad).

-La numeración de cada página irá colocada en el margen derecho en las labores de maquetación y diseño, por lo que no es necesario que la incluyan en el documento.

Ejemplo en [página siguiente](#)