

Metaheurísticas híbridas-paralelas para problemas industriales de corte, empaquetado y otros relacionados

Tesista: Mgs. Carolina Salto
Universidad Nacional de La Pampa
saltoc@ing.unlpam.edu.ar

Co-Director: Dr. Guillermo Leguizamón
Universidad Nacional de San Luis
legui@unsl.edu.ar

Director: Dr. Enrique Alba
Universidad de Málaga - España
eat@lcc.uma.es

Tesis presentada en la Facultad de Cs. Físico Matemáticos y Naturales (UNSL)
para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Computación
Fecha de inscripción: junio de 2006 – Fecha de defensa: Octubre de 2009

1. Introducción

Los problemas de corte y empaquetado (C&P) consisten, por lo general, en el corte de materias primas para obtener un conjunto de elementos minimizando el desperdicio de material generado o en el empaquetado de un conjunto de artículos en el menor número de contenedores. Esta clase de problemas cae dentro de la categoría de problemas de optimización combinatoria. Usualmente, se presentan en muchas aplicaciones industriales, tales como: vidrio, papel y corte de acero; carga de contenedores y camiones; diseño de circuitos integrados; optimización de portfolio; y muchas otras.

La mayoría de los problemas de optimización combinatoria, y por consiguiente los problemas de corte y empaquetado, son, en general, difíciles de resolver en la práctica. Estos problemas están incluidos en la clase de problemas \mathcal{NP} -duros [11], ya que no se conocen algoritmos exactos con complejidad polinómica que permitan resolverlos. Debido a su intratabilidad, se han diseñado una gran cantidad de métodos aproximados, los cuales encuentran buenas soluciones en tiempos computacionales razonables. En esta clase de problemas, la búsqueda de una solución requiere una exploración organizada a través del espacio de búsqueda: una búsqueda sin guía es extremadamente ineficiente.

Durante la década de los sesenta se han diseñado diversos métodos aproximados, conocidos como heurísticos, capaces de encontrar soluciones de buena calidad, y que en muchos casos son muy cercanas a la solución óptima o mejor conocida. Gran parte de estos métodos fueron concebidos inspirándose en la resolución de problemas de fácil representación, pero de muy difícil solución, como lo son el problema del vendedor viajero, el problema de la mochila, etc. Debido a la variada naturaleza de estos problemas, los métodos eran útiles apenas para el problema para el cual habían sido inspirados.

En los últimos 20 años han aparecido una nueva clase de algoritmos, basados en la combinación de métodos heurísticos básicos en un marco de alto nivel para explorar en forma eficiente y eficaz el espacio de búsqueda. Esos métodos son comúnmente denominados metaheurísticas [3, 6, 13]. El surgimiento de las técnicas metaheurísticas plantea un cambio importante en el desarrollo de técnicas alternativas frente a heurísticos *ad hoc*, ya que permiten extender de manera estructurada su aplicación a una amplia gama de problemas de optimización representativos del mundo real. Este hecho, junto con su notable eficacia, actuaron como los principales atractivos de la atención de la comunidad científica.

Como mecanismo para mejorar la eficiencia de las metaheurísticas, se han propuesto en los últimos años distintas versiones paralelas de las mismas [2]. Otros enfoques diferentes toman en cuenta el diseño de algoritmos de híbridos, la creación de operaciones especializadas para el problema en cuestión, etc.

Sin embargo, utilizar algoritmos paralelos es una forma de aliviar los problemas vinculados a tiempos intensivos de ejecución e importantes requerimientos de memoria para resolver instancias complejas de interés actual. Varias estrategias de paralelización se pueden aplicar a las metaheurísticas. Entre ellas, existen modelos paralelos donde varios hilos de búsqueda simultáneamente exploran el espacio de soluciones. Si cada uno usa diferentes procedimientos de búsqueda, obtenemos una metaheurística heterogénea paralela. La utilización de múltiples hilos de búsqueda usando diferentes estrategias y valores de los parámetros permite una mayor diversidad y una más profunda exploración del espacio de búsqueda, lo que podría llevar a soluciones más precisas.

El planteamiento propuesto en el trabajo de tesis se basa en aplicar técnicas metaheurísticas a problemas de corte y empaquetado. En particular, el trabajo de tesis está enfocado a una de las variantes más conocidas del problema de C&P como lo es el problema de *strip packing*, en el cual la característica más importante es que la plancha de material, donde se deben asignar las distintas piezas rectangulares, tiene una de las dimensiones libres (por lo general la altura). Para tal fin, hemos diseñado distintas metaheurísticas, ya sea desde su configuración como también en la información del problema que pueden incorporar, para sacar máximo partido a dichas técnicas y ofrecer así soluciones de gran calidad. También hemos planteado distintas versiones paralelas de las mismas y propuesto versiones paralelas heterogéneas, basadas en el comportamiento estudiado previamente, para desarrollar metaheurísticas más robustas.

2. Objetivos

En esta tesis se propone aplicar metaheurísticas secuenciales y paralelas a problemas de empaquetado, analizar los resultados para comprender el comportamiento de estos algoritmos y proponer nuevos métodos para resolver los problemas de una manera más eficaz y eficiente. Los objetivos específicos que se esperan alcanzar con esta tesis son:

- Diseño, implementación y evaluación de modelos algorítmicos que incluyan conocimiento del problema en cuestión en el dominio de corte y empaquetado y posiblemente otros dominios afines. Como subobjetivo inicial será necesario un extenso estudio de la literatura existente en este campo y la definición de los problemas concretos de análisis.
- Definición y estudio de extensiones paralelas de los modelos desarrollados, de manera que no sólo se aproveche la potencia numérica inherente a las técnicas descentralizadas sino que también se puedan obtener ganancias en tiempo real al utilizar un conjunto de computadoras para resolver el mismo problema.
- Inclusión de heterogeneidad en modelos descentralizados para los problemas designados. Es de interés que las técnicas diseñadas puedan extenderse para contener componentes distintos que se complementen en el sentido diversificación/intensificación, que actualmente se considera la piedra angular de la optimización moderna.
- Desarrollo de nuevas técnicas de acuerdo a las técnicas modernas de Ingeniería del Software (orientación a objetos, bibliotecas estructuradas en componentes, modularidad, corrección, etc.).

3. Aportes

En esta sección se enuncian, en forma resumida y esquemática, los aportes realizados con la presente tesis, a saber:

- Desarrollo de un nuevo modelo matemático para el problema de *strip packing* considerando las restricciones impuestas en este trabajo de tesis.
- Desarrollo de un operador de recombinación que incorpora conocimiento del problema (BILX).
- Desarrollo de reglas de construcción para generar una población inicial más especializada para el problema en cuestión.

- Propuesta de operadores de relocalización basado en heurísticas *ad hoc* bien conocidas para el problema (MFF_Adj y MBF_Adj).
- Adaptación del algoritmo optimización basada en colonias de hormigas para resolver el problema *strip packing*, en lo que respecta a la definición del rastro de feromonas, la conformación del vecindario alcanzable por una hormiga y la hibridación con búsqueda local.
- Diseño y evaluación de algoritmos heterogéneos, donde las islas están conformadas por algoritmos que implementan distintos mecanismos de búsqueda.
- Implementación de un generador de instancias de complejidad variable para el problema de C&P, debido a que las instancias encontradas en la bibliografía [4, 5, 19] resultan de desigual complejidad para la prueba de los algoritmos.

De cada uno de estos puntos, se ha realizado una importante labor de divulgación, tanto a nivel nacional como internacional, en conferencias y revistas de impacto (véase Apéndice A).

4. Organización de la tesis

Este trabajo de tesis se organiza en tres partes principales. En la primera, se presentan los conceptos de metaheurísticas y se caracterizan los problemas de corte y empaquetado. En la segunda parte se presentan las propuestas algorítmicas para resolver el problema como así también los resultados obtenidos con estas propuestas al resolver el problema de *strip packing*. En la tercera y última parte se esbozan las conclusiones a las que se ha arribado al realizar este trabajo, junto con las líneas de investigación que se abren a partir de nuestro estudio. A continuación mostramos en detalle el contenido de los distintos capítulos que conforman esta memoria.

- **Parte I: Fundamentos de las metaheurísticas y los problemas de corte y empaquetado**
En el **Capítulo 2** se ofrece una introducción sobre el campo de las metaheurísticas. Posteriormente se dan detalles sobre los mecanismos avanzados para los algoritmos metaheurísticos que se usan en esta tesis: paralelismo y heterogeneidad. El capítulo concluye con una descripción genérica de las metaheurísticas utilizadas en este trabajo de tesis.
En el **Capítulo 3** se presentan los problemas de corte y empaquetado, resaltando las características de los mismos, para luego describir en particular el problema de *strip packing* en dos dimensiones que se ha resuelto con técnicas metaheurísticas en la presente tesis. En la parte final del capítulo se dan detalles de las instancias del problema utilizadas en los capítulos posteriores. En el **Capítulo 4** se realiza una revisión de la literatura existente resumiendo las distintas soluciones existentes para el problema de *strip packing* usando heurísticas y metaheurísticas.
- **Parte II: Resolución del problema de corte y empaquetado**
En los **Capítulos 5 y 6** se resuelve el problema de *strip packing* por medio de algoritmos genéticos y algoritmos de optimización basados en colonia de hormigas, respectivamente. Se detallan los algoritmos utilizados junto con las modificaciones propuestas para introducir mejoras. Además, se presentan los resultados obtenidos con estos algoritmos y se discuten los mismos.
En el **Capítulo 7** se aborda la resolución de este problema por medio de la inclusión de técnicas paralelas. Por consiguiente, se describen las mismas, se analizan los resultados ofrecidos y finalmente se muestran las principales conclusiones que se pueden extraer de todo este proceso.
En el **Capítulo 8** describimos las distintas propuestas heterogéneas planteadas y se comparan sus resultados desde un punto de vista de eficacia y de paralelismo.
- **Parte III: Conclusiones**
En el **Capítulo 9** finalizamos este trabajo de tesis resumiendo el trabajo presentado y dando una mirada hacia las posibles tareas futuras y desarrollos.

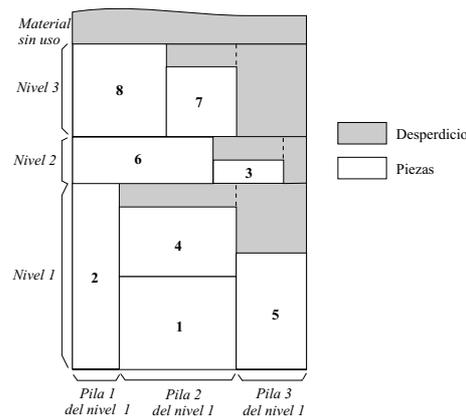


Figura 1: Patrón de empaquetado por niveles

5. Problema de empaquetado en dos dimensiones con restricciones: 2SPP

Los problemas de corte y empaquetado (C&P) son un conjunto de problemas ampliamente estudiados, los cuales son definidos como problemas combinatorios geométricos. Partiendo de unos modelos básicos, se encuentra gran cantidad de variantes derivadas de la amplia gama de aplicaciones prácticas existentes y dependiendo de quién lo esté tratando.

El *problema de strip packing en dos dimensiones* o *2-dimensional strip packing problem* (2SPP) está presente en muchas aplicaciones del mundo real tal como en la industria del vidrio, papel, textil, entre otras, con algunas variaciones en su formulación básica. Por ejemplo, se deben cortar varias piezas irregulares de un rollo de tela para confeccionar una prenda. Un mueble puede necesitar piezas rectangulares de vidrio, como también de madera. En todos los casos, es necesario minimizar tanto la cantidad usada como el desperdicio. Se han propuesto varias opciones en la literatura y, a nuestro entender, la revisión más completa ha sido presentada en [17]. Sin embargo, en los últimos años el interés en esta área ha crecido, también como el número de trabajos presentando nuevas opciones y mejoras a las estrategias existentes.

Generalmente, 2SPP consiste de: *i*) un conjunto de M piezas rectangulares $\pi_i, i \in (1, \dots, M)$, caracterizadas por su ancho w_i ($0 < w_i \leq W$) y su alto h_i ($h_i \geq 0$), y *ii*) un gran rectángulo de ancho fijo W y altura ilimitado H , denominado *plancha*. El objetivo es hallar una distribución de todas las piezas en la plancha que minimice la altura H requerida de la plancha y, cuando fuese necesario, se consideren restricciones adicionales. Las piezas se deben empaquetar de manera tal que no se superpongan y que sus lados queden paralelos a los lados de la plancha (cortes ortogonales). En función de la tipología mejorada propuesta por Wäscher et al. [22], este problema se categoriza como problema regular de dimensión abierta en dos dimensiones (2D regular ODP) con una única dimensión variable.

Adicionalmente, en el presente estudio se imponen otras restricciones en la formulación del problema: las piezas no se pueden rotar y se deben empaquetar formando patrones respetando niveles en tres etapas. En esos patrones, las piezas se empaquetan en *niveles* horizontales, paralelos a la base de la plancha. Cada nivel consiste de un conjunto de *pilas*, y cada pila consiste de un conjunto piezas que poseen el mismo ancho. La Figura 1 muestra un ejemplo de un patrón de empaquetado factible para este problema. Los patrones en tres niveles se usan en muchas aplicaciones reales, principalmente en las industrias metalúrgicas y de vidrio, y es por esta razón que se incorpora esta restricción en la formulación del problema

Las instancias abordadas en este trabajo se obtuvieron de una implementación propia de un generador de datos, siguiendo las ideas propuestas por [21]. Las instancias se encuentran públicamente

disponibles ¹. Este conjunto de datos de prueba ha sido generado de una manera estructurada para poder realizar la experimentación de forma coherente, exhaustiva en cuanto a los valores de los atributos de las piezas. Además para evitar disparidades en la complejidad de los datos de prueba existentes. Por otra parte es de destacar la ausencia, en los papers existentes en la literatura, de los datos que medimos en este estudio y de las características del problema de *strip packing* consideradas, como hemos resaltado en la revisión de trabajos existentes en la literatura, lo que representa un aporte importante de este trabajo.

6. Metaheurísticas propuestas para resolver 2SPP

Una metaheurística se puede definir como una estrategia de alto nivel que combina diferentes métodos para explorar el espacio de búsqueda [6, 12]. Se trata de un modelo general que debe ser llenado con el conocimiento específico del problema (representación de las soluciones, operadores, etc) y de tratar de resolver problemas con espacios de búsqueda muy grande. Dentro de las metaheurísticas podemos distinguir dos tipos de estrategias de búsqueda. Por un lado, tenemos las extensiones “inteligentes” de los métodos de búsqueda local (metaheurísticas basadas en trayectoria). El objetivo de estas estrategias es evitar de alguna forma los mínimos locales y moverse a otras regiones prometedoras del espacio de búsqueda. Este tipo de estrategia es el seguido por la búsqueda tabú, la búsqueda local iterada, la búsqueda con vecindario variable y el enfriamiento simulado. Estas metaheurísticas trabajan sobre una o varias estructuras de vecindario impuestas por el espacio de búsqueda. Una estrategia distinta es la seguida por los algoritmos basados en colonias de hormigas o los algoritmos evolutivos; éstos incorporan un componente de aprendizaje en el sentido de que, de forma implícita o explícita, intentan aprender la correlación entre las variables del problema para identificar las regiones del espacio de búsqueda con soluciones de alta calidad. Estos métodos realizan, en este sentido, un muestreo sesgado del espacio de búsqueda. Estas metaheurísticas se denominan basadas en población.

De un análisis de las diferentes alternativas presentes en la literatura que resuelven 2SPP con metaheurísticas, se desprende que las metaheurísticas más utilizadas en este caso son los algoritmos genéticos (GAs) [16]. Este último tiempo también se empieza con la aplicación, y con buen resultado, de otras metaheurísticas más nuevas como lo son algoritmos de optimización basados en colonia de hormigas (ACO) [8, 9] y GRASP [10, 20]. Por esta razón adoptamos GAs y ACO como motores de búsqueda de buenas soluciones a 2SPP. Por cada una de las metaheurísticas hemos realizado una pormenorizada descripción de su adecuación para resolver 2SPP.

6.1. Algoritmos genéticos para resolver 2SPP

Abordamos la solución de 2SPP con un GA, con el objetivo de encontrar un patrón de empaquetado de altura mínima. Los GAs tratan con una población de soluciones tentativas, y cada una codifica una solución al problema sobre las que se aplican los operadores genéticos de una manera iterativa para computar progresivamente nuevas soluciones de mayor calidad.

Tomando como punto de partida un GA básico, en este trabajo investigamos las ventajas de utilizar operadores de recombinación y mutación que incorporan conocimiento específico del problema, tal como información respecto de la asignación de las piezas, contra otros operadores genéticos clásicos. En particular, analizamos el comportamiento de esta metaheurística al variar distintos operadores de recombinación y mutación y estudiamos sus ventajas relativas para resolver el problema, con el objetivo de encontrar la mejor configuración. A fin de reducir el desperdicio en cada nivel, se aplica un operador adicional, llamado operador de relocalización, a cada hijo generado. También investigamos las ventajas de agregar semillas en la población inicial, las cuales se generan utilizando un conjunto de reglas de construcción; la característica esencial es incluir información del problema en cuestión, tal como ancho

¹<http://mdk.ing.unlpam.edu.ar/~lisi/2spp.htm>

de piezas, área de las piezas, etc. La intención de este estudio es que la población inicial resulte más especializada para el problema bajo análisis. Por último, discutimos la inclusión de conocimiento del problema en el método de búsqueda de un GA para presentar técnicas híbridas más eficientes para resolver 2SPP.

Los resultados muestran que GA usando los operadores genéticos propuestos en este trabajo han resultado ser muy eficiente para resolver 2SPP comparado con GA aplicando operadores tradicionales de permutaciones, no sólo por la bondad de sus resultados sino también por el menor número de evaluaciones que necesita. Esto sugiere que el diseño de operadores genéticos que incorporan información específica del problema en cuestión funcionan especialmente bien comparados con operadores tradicionales. Las distintas reglas diseñadas para generar semillas, las cuales se incorporan en las poblaciones iniciales de GA, han mostrado ser un mecanismo simple y rápido para incrementar la bondad de las poblaciones iniciales de GA y además para obtener buenos patrones de empaquetado finales en un número menor de evaluaciones.

6.2. Resolución de 2SPP usando colonias de hormigas

En esta sección se presentan las aportaciones metodológicas respecto de ACS realizadas en esta tesis doctoral para resolver 2SSP. Esta metaheurística emplea estrategias inspiradas en el comportamiento de las colonias de hormigas para descubrir fuentes de alimentación. Mientras que una hormiga realiza su camino va depositando una sustancia química, denominada *feromona*. Esta sustancia ayudará encontrar la comida al resto de las hormigas. Como resultado de la exploración y cooperación entre los individuos de la colonia se establece, en general, el camino más corto entre dicha fuente de alimentación y el hormiguero. Este comportamiento es el que intenta simular este método para resolver problemas de optimización. La técnica se basa en dos pasos principales: construcción de una solución basada en el comportamiento de una hormiga y actualización de los rastros de feromonas artificiales.

Los aspectos importantes de ACS que deben ser adaptados al problema son: la información heurística considerada, la definición del rastro de feromonas, la regla de transición de estados y la función objetivo. Se han propuesto distintas formas de codificar el rastro de feromonas, atendiendo a las particularidades del problema, como así también el tipo de información heurística considerada durante el proceso de construcción de soluciones. Los resultados han mostrado una clara ventaja al usar como preferencia heurística la altura de las piezas, justificado por la forma en que se construyen los patrones de empaquetado. Por otra parte, hemos usado la propiedad de que C&P es un problema de agrupamiento para definir el significado del rastro de feromonas: se ha dado preferencia a la asignación de dos piezas en un mismo nivel; esta alternativa ha permitido obtener buenos resultados para 2SPP, como era de esperar, al compararla con la alternativa de codificar la preferencia de que dos piezas estén consecutivas en patrón de empaquetado. Ambos componentes: información heurística y definición del rastro de feromonas han mostrado ser claves para un adecuado funcionamiento del proceso de búsqueda de ACS propuesto.

Se presentaron diferentes alternativas para hibridar un ACS con el objetivo de lograr algoritmos más avanzados para el tratamiento de 2SPP. Finalmente incorporamos a un ACS memoria externa, la cual almacena soluciones parciales en la forma de grupo de piezas, pertenecientes a niveles con desperdicio mínimo, obtenidas de soluciones elites generadas por las hormigas en iteraciones previas. Estas soluciones parciales se seleccionan en función de cierta información obtenida de la distribución de las piezas. Durante la construcción de las soluciones, las hormigas copian parte de la solución desde la memoria externa y luego toman sus decisiones en base a los rastros de feromonas y la información heurística. El estudio, validado desde el punto de vista estadístico, analiza la capacidad de las distintas opciones para generar nuevas soluciones potencialmente prometedoras y la habilidad para mantener poblaciones diversificadas.

6.3. Resolución de 2SPP usando opciones híbridas

La hibridación con heurísticas específicas del problema, en particular una modificación a la heurística *first fit decreasing* [7] (MFF), ha resultado ser una estrategia muy prometedora para obtener soluciones competitivas tanto en GAs como en ACSs, intensificando la búsqueda alrededor de algunas regiones del espacio de soluciones. Por lo general los resultados muestran que los GAs hibridados con MFF han obtenido los mejores patrones de empaquetado para 2SPP comparados con algoritmos ACSs en tres de las cinco instancias analizadas. La excepción la constituye la instancia con 250 piezas, para la cual los motores de búsqueda basados en ACS han mostrado una versatilidad especial en casi todas las variantes propuestas a lo largo de este trabajo de tesis. En particular, el mejor valor para esta instancia es reportado por algoritmo multicolonias con memoria externa.

6.4. Metaheurísticas paralelas y 2SPP

En esta sección detallamos las variantes paralelas de los algoritmos poblacionales (algoritmos genéticos y algoritmos basados en colonia de hormigas) propuestos en este trabajo para resolver 2SPP con restricciones. En ambos casos se utilizó una estrategia de paralelización que consistió en un modelo multipoblacional (modelo isla), en el cual se realizan intercambios esporádicos de individuos, denominado proceso de migración, entre las distintas subpoblaciones. La política de migración define: *i*) la topología de intercomunicación, *ii*) cuándo se realizan las migraciones, *iii*) cuáles son los individuos para intercambiar, *iv*) la sincronización entre las subpoblaciones y *v*) la forma de integrar los individuos recibidos en la subpoblación receptora.

Las características de los modelos propuestos distribuidos tanto de GA como de ACS han mostrado ser técnicas rápidas que producen buenos patrones de empaquetado, lo que representa un avance prometedor en este ámbito. Los algoritmos distribuidos han sido capaces de obtener un mejor rendimiento numérico (menor esfuerzo) con similares niveles de precisión comparado con sus versiones secuenciales. La resolución de 2SPP con nuestros modelos distribuidos ha permitido obtener valores de *speedup* cercanos al lineal en la mayoría de los casos, observándose también valores superlineales, indicando que los modelos paralelos propuestos han tomado ventaja de los elementos de procesamiento adicionales.

6.5. Metaheurísticas paralelas heterogéneas propuestas para 2SPP

Finalmente, hemos incursionado en el ámbito de metaheurísticas paralelas heterogéneas (PHMs) donde cada uno de los hilos de búsqueda utiliza un procedimiento de búsqueda distinto, ya sea a nivel algorítmico o a nivel de configuración de parámetros. Se ha brindado una definición de las metaheurísticas heterogéneas junto con una clasificación de las mismas [18].

La principal característica de nuestros algoritmos heterogéneos es la utilización de múltiples hilos de búsqueda usando diferentes configuraciones algorítmicas. Proponemos varias clases de PHMs: (a) PHM basadas en operadores aplicando diferentes operadores de recombinación; (b) PHM basadas en la variación de parámetros donde cada hilo de búsqueda aplica diferentes valores de parámetros y (c) PHM basadas en distintas configuraciones donde cada hilo de búsqueda es una metaheurística distinta. Los modelos que nos ocupan en este trabajo presentan diferentes niveles de heterogeneidad. Por un lado, ellos son *modelos heterogéneos basados en la configuración de parámetros* (ver por ejemplo [1, 15]), ya que las subpoblaciones usan diferentes valores de probabilidades del operador de relocalización. Pero las subpoblaciones también utilizan distintos operadores de recombinación, por lo que pueden considerarse como *heterogeneidad basada en operadores* [14]. Por otro lado, los modelos muestran *heterogeneidad basada en colaboración*, ya que sus respectivas subpoblaciones cooperan, pero no compiten, a fin de realizar la búsqueda. El desempeño de nuestras propuestas heterogéneas se compara con algoritmos homogéneos (GAs paralelos homogéneos -PHoGA- y ACS paralelos homogéneos -PHoACS-) tanto desde un punto de vista numérico como desde el esfuerzo computacional.

Los resultados han revelado que las PHMs basadas en operadores y basadas en variación de parámetros se comportan de manera similar a PHoGA en cuanto a calidad de resultados. Además, las PHMs basadas en operadores resultaron técnicas más rápidas cuando se las compara con PHoGA y PHMs basadas en variación de parámetros. Respecto al comportamiento paralelos, las PHMs basadas en operadores y basadas en variación de parámetros han exhibido tasas de éxito mayores a PHoGA, resultando además más adecuadas para paralelizar que PHoGA por los altos valores de *speedup*. Ha sucedido algo notable y es que PHoACS ha obtenido tiempos de ejecución más elevados que PHoGA y el resto de las PHMs, con pobre calidad de soluciones.

7. Conclusiones

Esta tesis doctoral ha estado dedicada a la resolución de problemas de corte y empaquetado utilizando técnicas metaheurísticas. En particular el problema que se ha abordado es el de *strip packing* (2SPP), que consiste en empaquetar un conjunto de piezas rectangulares en una plancha de material cuya característica es que una de sus dimensiones (por lo general el alto) no está definida. El objetivo es entonces encontrar una distribución de todas las piezas, sujeta a un conjunto de restricciones, en la plancha de modo tal de minimizar la altura necesaria para empaquetar todas las piezas. Este problema tiene una aplicación real, ya que está presente en numerosas situaciones en la industria como el corte de vidrio, entre otros.

El análisis de los resultados de las distintas alternativas propuestas en este trabajo de tesis ha mostrado que la incorporación de información del problema en el método de búsqueda de una metaheurística es un aspecto clave para diseñar técnicas más eficientes para resolver 2SPP. Esto se ve reflejado en que el diseño de operadores genéticos que incorporan información específica del problema en cuestión funciona especialmente bien comparado con operadores tradicionales, no sólo por la bondad de sus resultados sino también por el menor número de evaluaciones que necesita. La correcta adecuación tanto de la información heurística que usan las hormigas para construir una solución como de la codificación del rastro de feromona ha mostrado ser fundamental para que ACS obtenga buenos patrones de empaquetado.

Como resumen de este trabajo de tesis doctoral, podemos indicar que los mejores valores numéricos para cada una de las instancias están dadas por alguno de los algoritmos genéticos desarrollados usando el operador de relocalización, que ha mostrado brindar un correcto equilibrio entre exploración y explotación. La excepción se presenta en la instancia con 250 piezas, para la cual las versiones multicolonias obtienen los mejores patrones de empaquetado. Si bien no se puede decir cuál es el algoritmo más adecuado para resolver el conjunto de instancias, un algoritmo heterogéneo basado en variación de operadores es el algoritmo que figura en las primeras posiciones del ordenamiento para todas las instancias. Por otra parte, si se considera que es un algoritmo paralelo, corre en ventaja con el resto de los algoritmos si se analizan sus tiempos de ejecución. Por lo tanto, el objetivo de obtener un método mejorado para resolver 2SPP ha sido alcanzado al diseñar nuestros PHMs. Los resultados obtenidos han sido siempre validados por estudios estadísticos, lo cual da sustento a las conclusiones aquí vertidas dando rigurosidad a los estudios existentes.

7.1. Trabajos futuros

La incorporación de información representativa del problema de empaquetado dentro de la dinámica de las metaheurísticas ha probado ser fuente de información para que la búsqueda se dirija a regiones del espacio con soluciones cercanas a la óptima. Esta incorporación de información se puede dar en operadores genéticos, en semillas para la inicialización de la población, en el proceso de construcción de la solución que realizan las hormigas, etc. Estas ideas se podrían trasladar a otros problemas de optimización donde las soluciones se representen por medio de permutaciones.

El trabajo futuro en sistemas heterogéneos es altamente prometedor. Planeamos extender el concepto de heterogeneidad a los parámetros que afectan a la dinámica de los métodos paralelos distribuidos. En concreto, los parámetros que definen la topología y la frecuencia del intercambio de información son los que más condicionan el comportamiento del método y, en consecuencia un buen ajuste de estos parámetros es vital para un rendimiento óptimo.

Apéndice A. Relación de publicaciones que sustentan la tesis doctoral

En este apéndice se presenta el conjunto de trabajos que han sido publicados como fruto de las investigaciones desarrolladas a lo largo de esta tesis doctoral. Estas publicaciones avalan el interés, la validez y las aportaciones de esta tesis doctoral en la literatura, ya que estos trabajos han aparecido publicados en foros de prestigio y, por lo tanto, han sido sometidos a procesos de revisión por reconocidos investigadores especializados. A continuación se muestran las referencias de todas las publicaciones.

Revistas indexadas

- C. Salto, E. Alba and J.M. Molina. Analysis of Distributed Genetic Algorithms for Solving Cutting Problems. *International Transactions in Operational Research*, Volume 13/issue number 5, pág 403-423, septiembre de 2006.
- C. Salto, E. Alba, J.M. Molina and G. Leguizamón, Greedy Seeding Procedure for GAs Solving a Strip Packing Problem. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, Número Especial artículos seleccionados del Workshop de Agentes y Sistemas Inteligentes, Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, edición 2007. Volume 40, pág. 73-85, diciembre 2008.

Capítulos de libros

- C. Salto, J.M. Molina and E. Alba, Greedy Seeding and Problem Specific Operators for GAs Solving Strip Packing Problems, in *Optimization Techniques for Solving Complex Problems*, E. Alba, C. Blum, P. Isasi, C. León, and J.A. Gómez (Editores), Wiley, pág. 385-405, 2009.
- C. Salto, G. Leguizamón, E. Alba, and J.M. Molina, Evolutionary and ACO Based Approaches for Two-dimensional Strip Packing Problem, in *Natural Intelligence for Scheduling, Planning, and Packing Problems*, Raymond Chiong and S. Dhakal (editores), Springer-Verlag en la serie *Studies in Computational Intelligence*, vol 250, pág. 245-266, 2009.

Congresos internacionales publicados en la serie *Lecture Notes in Computer Science*

- C. Salto, E. Alba and J.M. Molina, Analysis of Distributed Genetic Algorithms for Solving a Strip Packing Problem, en *6th International Conference on Large-Scale Scientific Computations (LSSC07)*, volumen 4818 de LNCS, pág. 609-617, 2007.

Congresos internacionales

- C. Salto, G. Leguizamón, E. Alba and J.M. Molina, Hybrid Ant Colony System to Solve a 2-Dimensional Strip Packing Problem, en *Hybrid Intelligent Systems (HIS08)*, pág 708-713. 2008.
- C. Salto, E. Alba and J.M. Molina, Evolutionary Algorithms for Level Strip Packing Problem, en *Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies (NICSO 2006)*, pág. 137-148, 2006.
- C. Salto, E. Alba and J.M. Molina, Sequential versus Distributed Evolutionary Approaches for the Two-dimensional Guillotine Cutting Problem, en *International Conference on Industrial Logistics (ICIL 2005)*, pág. 291-300, 2005.

Congresos nacionales

- C. Salto, E. Alba, and G. Leguizamón, External Memory in a Hybrid Ant Colony System for a 2D Strip Packing, en *Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2009)*, 2009. En prensa.
- C. Salto, E. Alba, J.M. Molina and G. Leguizamón, Greedy Seeding Procedure for GAs Solving a Strip Packing Problem, en *Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC07)*, pág 1512-1523. 2007.
- C. Salto, E. Alba and J.M. Molina, A comparison of different recombination operators for the 2-dimensional strip packing problem, *XII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2006)*, pág. 1126-1138, 2006.

Referencias

- [1] P. Adamidis and V. Petridis. Co-operating populations with different evolution behaviour. *Proceedings of the Second IEEE Conference on Evolutionary Computation*, pages 188–191, 1996.
- [2] E. Alba. *Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms*. Wiley, 2005.
- [3] T. Bäck. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming*. Oxford University Press, New York, 1996.
- [4] J. Beasley. OR-Library: distributing test problems by electronic mail. *Journal of the Operational Research Society*, 41(11):1069–1072, 1990.
- [5] J. Berkey and P. Wang. Two-dimensional finite bin packing algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, 38:423–429, 1987.
- [6] C. Blum and A. Roli. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3):268–308, 2003.
- [7] E. Coffman, M. Garey, D. Johnson, and R. Tarjan. Performance bounds for level-oriented two-dimensional packing algorithms. *SIAM Journal on Computing*, 9:801–826, 1980.
- [8] M. Dorigo. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnica di Milano, Italy, 1992.
- [9] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 26(1):29–41, 1996.
- [10] T.A. Feo and M.G.C. Resende. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6:109–133, 1995.
- [11] M. Garey and D. Johnson. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman, New York, 1979.
- [12] F. Glover and G.A. Kochenberger. *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, London, 2003.
- [13] D. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [14] F. Herrera and M. Lozano. Gradual distributed real-coded genetic algorithms. Technical Report DECSAI-97-01-03, 1997.
- [15] R. Hintterding, Z. Michalewicz, and T.C. Peachey. Self-adaptive genetic algorithm for numeric functions. *Parallel Problem Solving from Nature (PPSN IV)*, pages 420–429, 1996.
- [16] J. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, 1975.
- [17] E. Hopper. *Two-dimensional packing utilising evolutionary algorithms and other meta-heuristic methods*. PhD thesis, University of Wales, Cardiff, U.K., 2000.
- [18] F. Luna, E. Alba, and A.J. Nebro. *Parallel Metaheuristics. A new class of algorithms*, chapter Parallel heterogeneous metaheuristics, pages 395–422. Wiley, 2005.
- [19] S. Martello and D. Vigo. Exact solution of the two-dimensional finite bin packing problem. *Management Science*, 44:388–399, 1998.
- [20] M.G.C. Resende and C.C. Ribeiro. *F. Glover and G. Kochenberger, editors, Handbook of Metaheuristics*, chapter Greedy randomized adaptive search procedures, pages 219–249. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [21] P.Y. Wang and C.L. Valenzuela. Data set generation for rectangular placement problems. *EJOR*, 134:378–391, 2001.
- [22] G. Wäscher, H. Haußner, and H. Schumann. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183:1109–1130, 2007.