

Un modelo de compactación de objetos irregulares bidimensionales como patrón de corte

Fernando Torres¹, David Mauricio¹, Luis Rivera², Percy De la Cruz¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, FISI
Av. German Amezaga s/n Lima 1, Lima, Perú
ftorres@avatarsrl.com, dms_research@yahoo.com, percyvdv@hotmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense, LCMAT-CCT,
Av. Alberto Lamego 2000, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil, 28015-620
rivera@uenf.br

Abstract

Are many activities that demand compacting scheme of geometric objects thus in Literature have come studying problems from cut of pieces, which are presents in diverse productive sectors; these problems, in some cases, are simple to specify but in all the cases they are extremely difficult to solve.

The primary target of this work is to implement a model of compacting of irregular geometric objects, oriented to solve the cutting problem of irregular pieces, which consists of diminishing the number of surfaces that lodge to a certain amount of irregular pieces in demand, to position the pieces in the respective surfaces, being allowed to diminish the lost one of material.

The solution for this problem is given through a computer program based on GRASP metaheuristic and the Dynamic Simulation, where the implemented algorithm selects the irregular pieces to position in each surface, soon to apply necessary physical parameters to them for the dynamic simulation. Once the pieces are compacted within each container has the compacted configuration, where the resulting waste is analyzed.

Keywords: compaction, pattern cutting, meta heuristic, simulation, GRASP

Resumen

Son muchas las actividades que demandan compactación de objetos geométricos, es por ello que en la literatura se han venido estudiando problemas de corte de piezas, los cuales se encuentran presentes en diversos sectores productivos; estos problemas, en algunos casos, son simples de especificar pero en todos los casos son extremadamente difíciles de resolver.

El objetivo principal de este trabajo es implementar un modelo de compactación de objetos geométricos irregulares, direccionado a la resolución del problema de corte de piezas irregulares el cual consiste en minimizar el número de superficies que alojen a una determinada cantidad de piezas irregulares en demanda, posicionar las piezas en las respectivas superficies, permitiendo con ello minimizar la pérdida de material.

La solución a este problema se entrega a través de un programa computacional, basado en la meta-heurística GRASP y la Simulación Dinámica, donde el algoritmo implementado selecciona las piezas irregulares a posicionar en cada superficie para luego aplicarles parámetros físicos necesarios para la simulación dinámica. Una vez que las piezas se compacten dentro de cada contenedor se tiene la configuración compactada, donde se analiza el desperdicio resultante.

Palabras clave: compactación, patrón de cortes, meta-heurística, simulación, GRASP.

Abstrac

Resumen

1. Introducción

La compactación de objetos geométricos se refiere a la forma de colocar objetos unos junto a otros y en contacto dentro de una superficie, de manera tal que ocupen el menor espacio posible. La complejidad de este proceso se hace más evidente cuando los objetos son de constitución irregular y a la vez son colocados en espacios también irregulares. Por ejemplo, cuando se desea colocar cajas de diferentes tamaños en espacios limitados, cuando se desea distribuir pedazos de piezas planas para cubrir eficientemente una región de las mismas características, o cuando se desea cortar eficientemente piezas a partir de otra de material mayor, etc.

Es de alto interés para las industrias de producción masiva, en especial para las que tienen alto índice de desperdicios en materia prima, poseer mecanismos de corte adecuados para conseguir mejoras en su productividad, lo cual proporcionaría beneficios tales como ahorro de materia prima y, por ende, una considerable disminución en los costos de producción. Hasta ahora son muchas las industrias que vienen realizando esquemas de corte de manera manual, es decir, realizan sus procesos de manera empírica, lo cual les dificulta optimizar el uso de materia prima.

Es así que en muchos procesos industriales se da el problema de cortes (cutting stock problem), también llamado Trim-Loss por algunos autores Dyckhoff [1], Gilmore-Gomory [2]. A lo largo de los años este problema ha incrementando su importancia y atención ya que, al resolverlo adecuadamente, se minimizan costos, pérdidas de material, niveles de inventario final y tiempo de máquina. En nuestro caso, el problema a tratar se enfocará a industrias en las cuales las demandas de corte de piezas posean forma irregular como son la industria de calzado, ropa, cartón, fabricación de máquinas, etc.

Por la naturaleza irregular de las piezas, hasta la actualidad no existe alguna técnica que resuelva el problema de manera eficiente, por esta razón el presente trabajo tiene como objetivo formular un modelo para generación de patrones de cortes irregulares, basado en métodos de compactación, combinando simulación dinámica con heurísticas de inteligencia artificial. Este modelo que se plantea permitirá reducir el desperdicio ocasionado por los procesos de cortes irregulares en las industrias, lo que trae consigo una reducción significativa de los costos de producción y el aumento de la competitividad.

Para la implementación del modelo propuesto se aplica la simulación dinámica y la técnica GRASP. La primera se encargará de compactar las piezas en el

recipiente; mientras que GRASP se encargará de minimizar el número de superficies a utilizar para una determinada cantidad de piezas de corte en demanda, asimismo, seleccionará las piezas que serán alojadas en cada superficie.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente forma: en la Sección 2, se revisará trabajos previos que se han realizado sobre compactación de objetos planos, en particular en cortes irregulares; en la Sección 3, se presentará la estructura de un sistema de compactación, enfatizando los módulos donde se implementa la meta-heurística GRASP así como el módulo de compactación de piezas; en la Sección 4 se valida el modelo planteado con instancias de pruebas ficticias y, finalmente, en la Sección 5, se muestran las conclusiones y se esbozan trabajos futuros.

2. Compactación como patrón de cortes

Los patrones de compactación están formados por superficies contenedoras y una cantidad determinada de piezas geométricas a ser distribuidas en las contenedoras. Las superficies contenedoras y las piezas en demanda son de constitución irregular, por lo que se requiere un tratamiento especial, tanto al momento de realizar la colocación de las piezas en las superficies como para realizar la compactación de los patrones de corte y conseguir una adecuada configuración final de las piezas en sus respectivas superficies contenedoras.

2.1. Objetos de geometría irregular

Se entiende por objeto de geometría irregular a todo objeto de contorno asimétrico que puede o no tener concavidades. Su geometría puede ser compuesta de pedazos de curvas, segmentos de rectas y puntos.

Según Rivera [3], podemos definir un objeto de geometría irregular a través de la unión de segmentos de curvas, de tamaños variados, descritos por la interpolación de un conjunto de puntos distribuidos en las proximidades del contorno del objeto deseado, cada segmento de curva será obtenido por la interpolación de un subconjunto de puntos adyacentes. Para el propósito de este trabajo, el objeto será representado por curvas B-splines cúbicas periódicas cerradas en su versión parametrizada [4].

Más detalle sobre la determinación de un objeto se puede encontrar en [3] y [4]. La Figura 1 ilustra un objeto con sus respectivos puntos de control. La forma de distribución de esos puntos de control definen contornos irregulares, por ejemplo, el posicionamiento bastante próximo de algunos puntos de control definen segmentos que presentan terminaciones con tendencias a puntas agudas; puntos de control colineales definen segmentos con tendencias a segmentos de rectas, etc. Entonces, cualquier tipo de pieza de corte irregular, en este caso, podrá ser representada por una distribución apropiada de puntos de control.

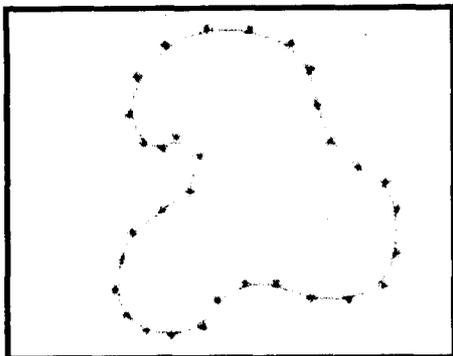


Figura 1. Objeto irregular compuesto por puntos de control.

2.2. Patrón de corte irregular

Antes de iniciarse el procedimiento de corte de una plantilla con las piezas requeridas, lo lógico es que se tenga un patrón de corte para que las piezas sean debidamente marcadas en la plantilla, de tal modo que los pedazos intermediarios, que posiblemente serán los desperdicios, sean mínimos. En el caso de cortes regulares, donde el predominio es la rectangularidad de las piezas e inclusive la forma de la plantilla, las cuales son combinadas en función de sus vértices y aristas, una al lado de la otra, cuidando que no exista la intersección entre las piezas.

En la literatura podemos encontrar algunos trabajos de piezas irregulares que han sido aproximados a polígonos, cuyos elementos son vértices y aristas. Estos trabajos son inspirados en métodos de resolución de corte regular pero con enfoques diferentes que los rectangulares; aún así, se observa deficiencia en la resolución de este tipo de problemas. La idea en los cortes irregulares, se reduce a la generación de un patrón de corte el cual presente una distribución eficiente de las piezas irregulares no poligonales en una plantilla que también puede ser irregular. Se busca que no exista intersección entre las piezas distribuidas en la plantilla y que la configuración final tenga una apariencia compactada, de esta manera se pretende reducir los pedazos intermediarios. La Figura 2 ilustra un ejemplo de un posible caso de compactación para cortes.

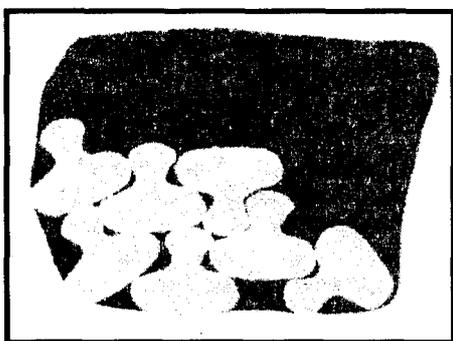


Figura 2. Un ejemplo de compactación de objetos en un sector de una plantilla.

La combinación de objetos con características definidas como irregular, usando métodos de cortes regulares o irregulares de constitución poligonal, es sumamente pesada, cuya solución exacta, aún con los computadores actualmente avanzados, es prácticamente imposible de obtenerse en tiempo prudencial. En este sentido, se vale de métodos heurísticos y otros métodos para determinar un patrón de corte considerablemente bueno, que permita así reducir los desperdicios.

2.3. Métodos de compactación existentes

Los trabajos encontrados, con resolución de cortes irregulares, se encuentran en textiles [5], tapetes [6], lona [7], entre otros. En la industria de ropa se destacan los trabajos experimentales de Milenkovic et al. [8] y Li y Milenkovic [9], sugiriendo rutinas de mejora en los procesos para producir soluciones manuales, los cuales se consideraban que eran más eficientes que las soluciones generadas por un computador de última generación. Los estudios de Albano y Sappupo [10] describen algoritmos que transforman el problema en encaje de piezas irregulares representados como poligonales.

Analizando la bibliografía empleada, se tiene que todos los trabajos encontrados para problemas de cortes irregulares se apoyan en objetos de geometría poligonal, los cuales se consideran como una aproximación bastante eficiente de los objetos irregulares. A continuación, se detallarán algunas metodologías enfocadas a dar solución al problema de cortes irregulares.

2.3.1. Métodos Heurísticos y Meta-Heurísticos

Los problemas de corte de piezas pertenecen a la clase de problemas para la cual ningún algoritmo polinomial ha sido encontrado, siendo estos problemas de la clase "NP-Difícil". Esto significa que los tiempos computacionales involucrados en la obtención de las soluciones óptimas son demasiado altos y con la tecnología actual no se puede contar con resultados prácticos. Es en estos casos, donde los métodos aproximados juegan un papel de gran importancia, siendo bien justificado el desarrollo de heurísticas para su resolución.

Los métodos heurísticos han sido ampliamente explorados en la resolución del problema de cortes regulares; entre éstos destacan las técnicas de Simulating Annealing [11], [28], Grafos AND/OR [12], [13], Tabu Search [14], Algoritmos genéticos [15], [16], Algoritmos híbridos [17], Algoritmo golosos FFD y BFD [18], entre otras. Entretanto, muchos de estos métodos usan directa o indirectamente el proceso de construcción de

patrones propuestos por Wang [19].

2.3.2. Técnicas para resolver el Problema de Cortes Irregulares

En [20] se encuentra una propuesta para la resolución del problema de cortes irregulares no convexos, tratando piezas de forma poligonal mediante un algoritmo genético. Para la implementación del algoritmo consideraron colecciones de plantillas de corte potenciales como individuos que conformaban la generación y la función objetivo que encontraron era la suma de las áreas de las piezas posicionadas completamente en la superficie con respecto al área total utilizada.

Tay et al. [21] presentaron un método basado en algoritmos genéticos para la resolución del problema de cortes irregulares considerando piezas de forma poligonal. El método consistía en el posicionamiento secuencial de las piezas en demanda ayudándose de un algoritmo genético el cual encontraba la mejor posición para ubicar cada pieza a lo largo de los límites de la superficie. El algoritmo propuesto permite posicionar cualquier tipo de pieza en una superficie con el criterio de que la pieza posicionada toque uno de los límites de la superficie. A las piezas se les permitía movimientos de rotación dentro de la superficie para encontrar su mejor ubicación la cual era la función de fitness del algoritmo genético; una vez conseguida la posición, el área de la superficie involucrada era disminuida en el área de la pieza que se está tratando.

Ismael y Hon [22] y Jane et al. [23] abordaron el problema de cortes irregulares poligonales usando algoritmo genético y simulated annealing. Ismael y Hon consideran tan sólo piezas de naturaleza lateralmente simétrica y un máximo de 180 grados de rotación para el criterio de posicionamiento de las piezas. El algoritmo que proponen presenta desventaja cuando se enfrenta a piezas que no son de naturaleza lateralmente simétrica. Jane et al. presentan un algoritmo para posicionar diferentes formas de piezas dentro de una superficie, las formas podían ubicarse en cualquier posición. Ellos en su estudio asumen que la posición del punto de referencia sobre la primera pieza posicionada es fija; para posicionar las siguientes piezas se necesita el ángulo de orientación de la primera pieza, las coordenadas de posicionamiento y orientación de las otras piezas y su desplazamiento dentro de la superficie. Como función de fitness, para cada pieza posicionada se mide la utilización del área, así como la penalidad (costo al superponer una pieza sobre otra al momento del posicionamiento) si es que se traslapa.

Oliveria y Ferreira [11] abordaron el problema de cortes irregulares de forma poligonal. Fijaron el tamaño de una lámina en stock y usaron la técnica de Simulated Annealing para intentar minimizar la longitud. Para la definición del conjunto de posibles soluciones permitieron que las piezas se pudieran traslapar. El costo de su función objetivo es una combinación lineal de la longitud requerida y un término de penalidad para una aproximación a la cantidad mínima de traslapación permitida. Dowsland y Dowsland [27], usaron una formulación similar al problema de Oliveria y Ferreria, pero también fijaron la longitud de la lámina en stock, por lo cual el único costo involucrado era la penalidad por traslapación. Una vez que una posible solución es encontrada, la longitud de la lámina es reducida y luego se intenta el encajamiento de la plantilla de corte dentro de la nueva longitud.

Blazewicz et al. [26] sugirieron un algoritmo de Tabu Search en el cual no se permite traslapación de piezas en las plantillas de corte. Las soluciones son obtenidas moviendo las piezas hacia una nueva posición buscando siempre un mejor movimiento en vez de coger una pieza aleatoria para posicionar. Este enfoque es superior que algunos métodos estándar de posicionamiento como el de Albano y Suppo [10], pero algunas veces presenta desventajas, ya que pierde soluciones obvias, las cuales sí son encontradas por otros métodos.

Milenkovic [32] usa la simulación física basada en posicionamiento para compactar objetos de forma poligonal representando cortes de ropa, obteniendo resultados relativamente buenos.

Dowsland y Dowsland [25] propusieron una rápida y eficiente implementación de un algoritmo de posicionamiento Bottom-Left para el empacamiento de polígonos. El algoritmo permite ir posicionando piezas en una superficie temporal con lo cual garantiza llenar espacios vacíos al momento de ir consiguiendo soluciones, permitiendo tener un conjunto infinito de soluciones para obtener el posicionamiento adecuado de cada una de las piezas a colocar. Su propuesta muestra alta confiabilidad en el manejo de posicionamiento de piezas poligonales, con lo cual se puede extender este estudio hacia algoritmos más avanzados que proveen criterios de selección de piezas.

Bennell et al. [24] proponen una técnica denominada "NoFit Polygon", la cual es una poderosa herramienta que trata la geometría de piezas irregulares de constitución poligonal para construir un algoritmo que resuelva el problema de cortes irregulares. El NoFit Polygon es obtenido a partir de dos polígonos, calculándose el más pequeño límite convexo para estos dos polígonos; este proceso se repite para todos

los polígonos a tratar. Para no caer en un cuello de botella, proponen la implementación de una cache, la cual guarda la información de evaluaciones previas de soluciones que ya han sido evaluadas. En su propuesta demostraron que aumentando el tamaño de la cache la velocidad de procesamiento de soluciones del algoritmo se incrementa considerablemente. Gomes y Oliveira [29] desarrollaron un algoritmo GRASP para resolver el problema de cortes irregulares considerando piezas de naturaleza poligonal y una superficie contenedora de naturaleza rectangular (ancho fijo e infinito largo). El objetivo del algoritmo era la minimización de la longitud de la superficie, buscando una secuencia de piezas para un adecuado posicionamiento. Para conseguir ello utilizaron una heurística de posicionamiento "Bottom-Left" para la generación de los patrones de corte.

Kim and Pellacini [30] introducen una técnica llamada Jigsaw image Mosaics para la construcción de imágenes finales a partir de formas arbitrarias. Teniendo en cuenta que tanto el contenedor como las figuras son de forma arbitraria, se desea llenar el contenedor hasta llegar a su compactación deformando ligeramente las piezas para un mayor efecto visual. Introducen un modelo basado en criterios de energía donde la construcción de un mosaico es definido en términos de energía, permitiendo la creación de varios mosaicos con tan sólo cambiar la función de energía. El algoritmo propuesto dio buenos resultados en la construcción de mosaicos, con lo cual se puede extender a atacar problemas de empacamiento de objetos usando técnicas más avanzadas como Simulated Annealing, gracias a la función de energía con la cual trabaja el algoritmo.

Frente a los métodos existentes planteados, anteriormente en la literatura, surge la necesidad de construir un método el cual trate de dar solución al problema de cortes irregulares de manera eficiente. Este trabajo propone una alternativa promisoriosa que puede superar a los métodos existentes en este tema. La referida alternativa está inspirada en un fenómeno natural que ocurre al aplicar efectos físicos de compactación a las piezas irregulares colocadas en un recipiente; está constituida por técnicas de animaciones basadas en leyes físicas con análisis de contactos y colisiones, modelo propuesto por Rivera [3] [33], para simular la compactación de los pedazos de cortes y la técnica GRASP [31], la cual permite crear los patrones de corte iniciales iterativamente.

3. Modelo de compactación basado en simulación y heurísticas

El modelo propuesto presenta una arquitectura, tal

como se ilustra en la Figura 3, compuesta por cuatro componentes principales: Entrada, Meta-heurística de Selección, Compactación por Simulación Dinámica y Salida. En la entrada, se define la información a procesar; en la meta-heurística de selección, se distribuyen las piezas en diferentes contenedores; en compactación, por simulación dinámica, se realiza iterativamente la compactación de las piezas en sus respectivos contenedores hasta conseguir un patrón suficientemente aceptable; en la salida, como es lógico, se representa los resultados de la compactación.

3.1. Entrada

La adquisición de datos será realizada por medio de una interfaz de usuario la cual permitirá el ingreso de las características geométricas, dinámicas y de simulación de las piezas y superficies a procesar, como también las características del ambiente de simulación y el grado de aproximación requerida.

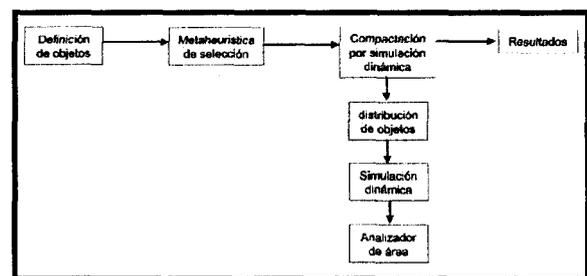


Figura 3. Diagrama de Arquitectura del Sistema.

Definición de Objetos

Los objetos tales como las piezas de corte y superficie contenedora, son ingresados al sistema como un conjunto de puntos de control respecto a su propio sistema de coordenadas y al origen del sistema de coordenadas de objeto respecto al sistema de coordenadas general. Esta información se almacenará en estructuras de datos que albergarán las características particulares de cada objeto. También son almacenados el identificador del objeto, sus características dinámicas tales como centro de masa, momentos de inercia, velocidad angular, orientación, etc. Los contenedores tendrán masa infinita e inercia cero para evitar que ellos se muevan cuando se aplique simulación dinámica a todos los objetos del ambiente, esto se da en el proceso de compactación.

3.2. Meta-heurística de Selección de Objetos

Este proceso es el encargado seleccionar y asignar una lista de piezas de corte para cada superficie contenedora. Para ese proceso, se usa la meta-heurística GRASP considerando como parámetros el área de las superficies contenedoras y suma de áreas de las piezas de corte. El criterio de optimización en

esta parte es maximizar el número de piezas que deben ser distribuidos en un mínimo número de superficies contenedoras. El algoritmo que invocará este proceso construye patrones de corte a partir de una lista de n piezas donde va extrayendo subconjuntos de m piezas para satisfacer las demandas de cada contenedor con el objetivo de minimizar el número de contenedores utilizados. La Figura 4 muestra un ejemplo del funcionamiento del proceso (n superficies contenedoras y sus respectivas piezas seleccionadas).

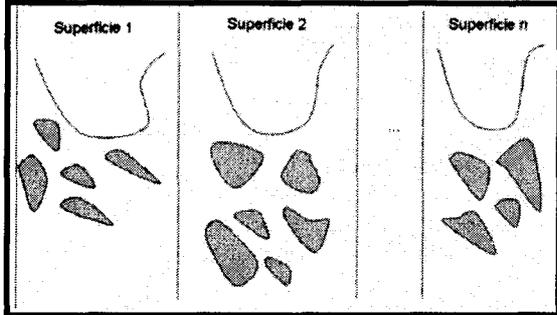


Figura 4. Ejemplo de Meta-heurística de Selección.

3.3. Compactación por Simulación Dinámica

El proceso de compactación por simulación dinámica es el responsable de la coordinación del funcionamiento del algoritmo. Se inicia con la colocación de los objetos en sus respectivos contenedores, simulación dinámica y llegando hasta el analizador de áreas.

Este proceso de compactación, compuesto por los tres subprocesos mencionados, se ejecuta en un número máximo de iteraciones. En cada iteración se compara el área desperdiciada del estado compactado respecto a la iteración anterior. La situación compactada con menor área desperdiciada se va guardando a través de todas las iteraciones. Así, después de máximo número de iteraciones se tendrá la mejor situación compactada con menor área desperdiciada. Esa situación compactada no quiere decir que sea la óptima, porque puede haber una mejor, pero entre todas las situaciones que fueron analizadas, resulta siendo la que presenta mejor calidad.

3.3.1. Colocación Inicial de los Objetos

Este proceso permite la creación del estado inicial (actual) de los objetos respecto a su superficie contenedora para luego proceder a su compactación. Las piezas atribuidas a cada superficie contenedora son colocadas siguiendo una política de no intersección de las piezas y pertinencia a la superficie contenedora. Lo ideal sería colocar inicialmente esas piezas de forma que se distribuyan ocupando toda la superficie del contenedor, así posteriormente la compactación reposicionará o acomodará las piezas

respecto unas de otras, siguiendo las leyes físicas del proceso de simulación.

Habría varias formas de colocación de las piezas en la superficie contenedora, la forma más simple es la colocación de las piezas una por una, aplicando caída libre dentro de la superficie contenedora, donde las piezas caen en disposición vertical respecto al centro de la superficie contenedora. Otro proceso sería, siguiendo una heurística tipo Bottom Left propuesta por Dowsland y Dowsland [25], que cada pieza se coloque desde la parte izquierda inferior hasta la derecha y superior, donde exista espacio, dentro de la superficie contenedora. Pero este método exige que las piezas y superficie contenedora sean poligonales.

3.3.2. Simulación Dinámica

Este proceso se encarga de la generación del movimiento, resolviendo unas ecuaciones diferenciales parciales que modelan los movimientos de los objetos (ver detalle en [3]) ejecutando en cada intervalo de tiempo llamado "paso de tiempo".

Las piezas en el ambiente de simulación se encuentran inmersas en el campo gravitacional actuando en dirección hacia en fondo de la superficie contenedora, adquiriendo comportamientos dinámicos e interacción (choques y colisiones - ver detalle en [3]) con las otras piezas y las paredes de la superficie que las contiene. Los cuerpos se van moviendo en este espacio hasta llegar a un estado final casi estático llamado estado de compactación. La Figura 5 muestra un estado de compactación de los cuerpos.

3.3.3. Analizador de Áreas

Cuando la simulación dinámica llega a un estado de compactación se debe activar el procedimiento de cálculo de áreas finales. Se procede a calcular un cerco convexo de las piezas compactadas, haciendo uso de un algoritmo de la geometría computacional. La Figura 5 muestra el cerco convexo para un conjunto de piezas compactadas.

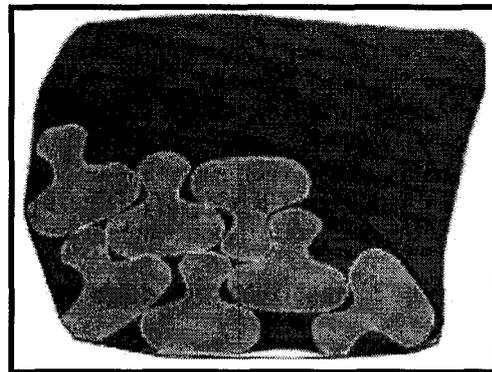


Figura 5. Ejemplo de compactación para análisis de áreas.

En esta situación se tienen el área del sector ocupado por las piezas compactadas y la suma de las áreas de las piezas. La diferencia de esas dos áreas será la posible área desperdiciada si esa situación compactada fuera el patrón final de corte. Pero, es necesario registrar la situación compactada actual como patrón de corte siempre que el área desperdiciado actual es menor que del proceso anterior, caso contrario, la mejor configuración sigue siendo la anterior.

3.4. Salida

Este proceso se encarga de mostrar los resultados obtenidos por el algoritmo. Existe un proceso de visualización que mostrará los patrones de corte resultantes permitiendo ver a los objetos involucrados en el ambiente de simulación en forma real. Se realizará para este fin un proceso de conversión de coordenadas de un sistema local a un sistema global donde, en situaciones reales de corte, se le atribuirá las dimensiones reales de las piezas envueltas.

3.5. Funcionamiento del Sistema

Inicialmente, el proceso de entrada realiza la captura de datos obteniendo las características de las piezas y superficies involucradas. Luego el proceso de Metaheurística de selección realiza una selección adecuada de piezas para posicionarlas en un número determinado de superficies contenedoras, aquí el algoritmo obtiene un posible patrón de corte iterativamente ejecutando la secuencia de subprocesos: colocación inicial de las piezas, compactación por simulación dinámica y análisis de áreas. La simulación dinámica, a su vez realiza la compactación iterativamente, siguiendo el fenómeno de movimientos y colisiones, hasta una situación casi estática.

En cada proceso de iteración de compactación, ejecutando los tres procesos posicionamiento inicial de piezas, compactación por simulación dinámica y análisis de áreas, es lógico que los resultados finales van a ser diferentes, toda vez que el posicionamiento inicial de piezas son diferentes en cada iteración. Esto, porque los objetos colocados verticalmente no siempre van a ser en la misma secuencia que de los casos anteriores; o usando el método de bottom left, también la secuencia de piezas diferentes de los casos anteriores generan situaciones diferentes en cada iteración. Comparando con el fenómeno natural, se puede decir que el proceso de posicionamiento inicial de piezas es equivalente a reposicionamiento de las piezas, después de una sacudida física de las mismas.

4. Resultados computacionales

Las instancias de prueba, están conformadas por las

demandas de corte de piezas (cantidad y tamaño de cada pieza de material) y la superficie contenedora que se tomará para alojar a las piezas. Se usarán 5 instancias de prueba diferentes, creadas con requerimientos de corte de piezas ficticios. El número de piezas en demanda varía en cada caso según la instancia.

Para los experimentos numéricos se utilizó una superficie contenedora patrón a la cual se fue variando en porcentaje el área ocupada; dependiendo de las instancias de prueba, esta área puede variar entre 40% y 60%. Por ejemplo, si el área de la superficie contenedora es 1200 m², para una instancia de prueba esta área puede ser 480 m² que representa al 40% ó 720m² que representa al 60% del área de la superficie.

Para poder llevar a cabo la ejecución del algoritmo se necesitaron parámetros GRASP y de simulación dinámica los cuales fueron calibrados para que el algoritmo sea eficiente. Como resultado de la calibración se obtuvo los valores para los parámetros de relajación GRASP Alfa y Beta $Alfa = 07$ $Beta = 0,5$, donde Alfa se refiere al tamaño de la pieza a seleccionar y Beta al número de piezas de un mismo tipo que serán posicionadas en un contenedor; los valores de simulación dinámica fueron $Paso de Tiempo = 0.025$, $Números de Frames = 340$, $Gravedad = 0.0$, $- 10.0, 0.0$ y $Tolerancia Mínima = 0.04e^{\circ}$.

En la Figura 6 podemos observar el resultado de la primera instancia de prueba obtenida luego de ejecutar el algoritmo.

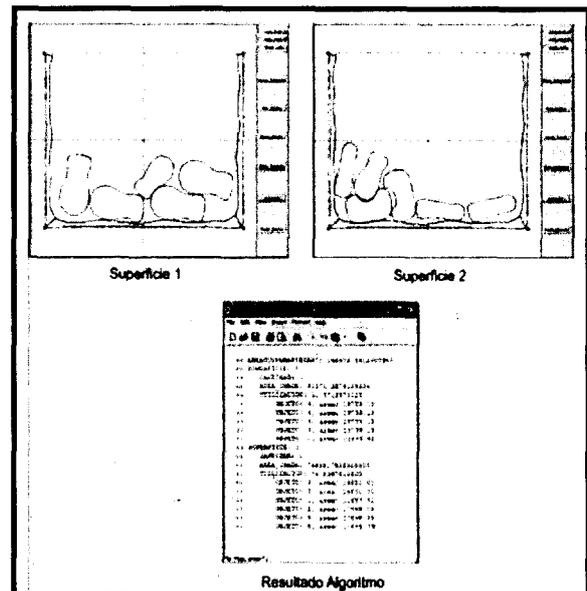


Figura 6. Figura Resultado Ejecución Instancia 1.

Seguidamente, se muestra mediante la Tabla 1, un resumen del resultado de la ejecución del algoritmo, presentando el número de superficies contenedoras utilizadas, la lista de objetos a posicionar, el porcentaje de error generado, el área utilizada y la solución óptima; así como la configuración final de cada superficie luego de la compactación.

Luego de realizar la ejecución de las 5 instancias de prueba, se procedió a analizar la confiabilidad del sistema mediante el error promedio obtenido, haciendo la comparación con la mejor solución en cada caso; el resultado fue un error promedio de 0%, por lo cual podemos decir que el sistema propuesto entregó soluciones de calidad. Las instancias de prueba con las que se probó el algoritmo son pequeñas, con lo cual podemos inferir que si aumentamos las demandas de corte, el algoritmo también entregará soluciones de calidad, pero que en término de tiempo de proceso puede demorar un poco más.

Resultado de las Pruebas								
Nombre	AreaSup	M	N	NGEN	SolGen	Error	AreaÚti	SolOpt
instancia1	100 000	5	11	500	2	0%	83.2%	2
instancia2	90 000	5	11	500	2	0%	92.44%	2
instancia3	105 000	5	14	500	2	0%	89.01%	2
instancia4	105 000	5	14	500	2	0%	95.78%	2
instancia5	120 000	5	14	500	2	0%	82.89%	2

1. Tabla de resultados de las pruebas.

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha propuesto e implementado un Algoritmo GRASP con Simulación Dinámica para resolver el Problema de Cortes irregulares, el cual tiene diversas aplicaciones en la industria. Se ha comprobado empíricamente que aplicando la metaheurística GRASP, se obtienen mejores resultados que los métodos tradicionales de la programación lineal entera con respecto a conseguir la cantidad mínima de superficies que alberguen una determinada cantidad de piezas irregulares en demanda. Para ello se ha desarrollado un sistema "SimulaCort" que implementa el Algoritmo GRASP con Simulación Dinámica lo que constituye el principal aporte de este trabajo.

Por medio de la utilización de un Algoritmo GRASP se han encontrado soluciones de calidad a distintas instancias de prueba del problema planteado. Con el objetivo de justificar este buen comportamiento se ha analizado los resultados obtenidos, encontrando en este algoritmo propuesto un bajo grado de error con respecto al área ocupada de las piezas en su respectiva superficie contenedora pero ningún error en la determinación del mínimo número de superficies. Se pretende que de este trabajo surjan otras técnicas para mejorar el tiempo de procesamiento de la

compactación de las piezas irregulares como el uso del método Bottom Left para el posicionamiento inicial de las piezas, con lo cual el tiempo de compactación de éstas dentro de la superficie contenedora se reduciría; también se podrían realizar trabajos para investigar acerca de otros métodos de detección de interferencias, con lo cual se agilizaría el tiempo de procesamiento del algoritmo.

Referencias bibliográficas

- [1] H. Dyckhoff. A typology of cutting and packing problems. *European journal of Operation Research*, v.44, 1990, 145-159.
- [2] P. Gilmore and R. Gomory. Multistage cutting stock problems of two and more dimensions. *European Journal of Operation Research*, v.14, 1965, 94-120.
- [3] L. Rivera. Animación Basada en Física de Modelos Geométricos en Multirresolución. Tesis de doctorado, Versión Portugués, Departamento de Informática, Pontificia Universidade Catolica do Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- [4] D.F. Rogers and J.A. Adams. *Mathematical Elements for Computer Graphics*. McGraw-Hill International Editions, 2do Edition, 1990.
- [5] A. A. Farley. Mathematical programming model for cutting stock problems in the clothing industry. *Journal of the Operation Research Society*, v.39, 1988, 41-53.
- [6] C.D. Liton A frequency approach to the one dimensional cutting problem for carpet rolls. *Operation Research Quarterly*, v.28, 1997, 927-938.
- [7] A. A. Farley. The cutting stock problem in the canvas industry. *European Journal of Operation Research*, v.44, 1990, 247-255.
- [8] V. Milenkovic, K. Daniels and Z. Li. Placement and compaction of non-convex polygons for clothing manufacture. *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Computational Geometry*, St. John's, Newfoundland, 10-14 Agosto, 1992, 236-243.
- [9] Z. Li and V. Milenkovic. A compaction algorithm for non-convex polygons and its application. *Proceedings of 9th Annual Symposium on Computation Geometry*, ACM, San Diego, CA, 1993, 153-162.
- [10] A. Alvano and G. Sappupo. Optimal Allocation of Two-Dimensional Irregular Shapes Using Heuristic Search Methods. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 5, 1980, 242-248.
- [11] J. F. Oliveira and J. S. Ferreira. Algorithms for nesting problems. R.V.V. Vidal (ed.), *Applied Simulated Annealing, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, v.396, Springer-Verlag, Berlin, 1993, 255-274.

- [12] R. N. Morabito, M. N. Arenales and V. F. Arcaro. An And-Or-Graph approach for two dimensional cutting problems. *European Journal of Operation Research*, v.58, 1992, 263-271.
- [13] V. Parada, A. Gómes and J. De Diego. Exact solutions for constrained two-dimensional cutting stock problems. *European Journal of Operation Research*, v.84, 1995, 633-644.
- [14] A. Lodi, S. Martello and D. Vigo. Approximation algorithms for the oriented two-dimensional bin packing problem. *European journal of Operation Research*, v.112, 1999, 158-166.
- [15] B. Kröger, P. Schwenderling and O. Vornberger. Parallel genetic packing of rectangles. In *Parallel Problem Solving from Nature 1st Workshop*, Springer Verlag: Berlin, 1991, 160-164.
- [16] B. Kröger. Guillotizable bin packing: a genetic approach. *European Journal of Operation Research*, v.84, 1995, 645-661.
- [17] S. Jacobs. On Genetic algorithms for the packing of polygons. *European journal of Operation Research*, v.88, 1996, 165-181.
- [18] D. Mauricio and R. Delgadillo. Algoritmos FFD y BFD para resolver el problema de cortes de Guillotina. Technical Report UPG-FISI, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Nro.01, 2002.
- [19] P. Y. Wang. Two algorithms for constrained two-dimensional cutting stock problems. *Operations Research*, v.31, 1983, 573-586.
- [20] R. Sharma, T. Balachander, C. McCord, S. Anand, Q. Zhang. Genetic Algorithms for the Single-Sheet and Multi-Sheet Non-convex Cutting Stock Problem. Computer Aided Manufacturing Laboratory, Industrial Engineering Program, University of Cincinnati, 1997.
- [21] F. Tay, T. Chong and F. Lee. Pattern nesting on irregular-shaped stock using Genetic Algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v.15, 2002, 551-558.
- [22] H.S. Ismail and K.K.B. Hon. New approaches for the nesting of two-dimensional shapes for press tool design. *International Journal of Production Research*, v.30,4, 1992, 825-837.
- [23] P. Jain, P. Fenyés and R. Richter. Optimal blank nesting using simulated annealing. *Transactions of the ASME*, v.114, 1992, 160-165.
- [24] Julia A. Bennell, K. A. Dowsland and W. B. Dowsland. The irregular cutting-stock problem a new procedure for deriving the no-fit polygon. *Computers & Operations Research*, v.28, 2001, 271-287.
- [25] K. A. Dowsland and W. B. Dowsland. An Algorithm for polygon placement using bottom left strategy. *European Journal of Operation Research*, v.141, 2002, 371-381.
- [26] J. Blazewicz, P. Hawryluk and R. Walkowiak. Using a tabu search approach for solving the two-dimensional irregular cutting problem. *Annals of Operations Research*, v.41, 1993, 313-327.
- [27] K. A. Dowsland and W. B. Dowsland. Heuristic approaches to irregular cutting problems. , Working Paper EBMS/1993/13, European Business Management School, UC Swansea, UK, 1993.
- [28] L. Faina. An application of simulated annealing to the cutting stock problem. *European journal of Operation Research*, v.114, 1999, 542-556.
- [29] A. M. Gomez and J. F. Oliveira. A Grasp Approach to the Nesting Problem. MIC'2001 - 4th Metaheuristics International Conference, 2001.
- [30] J. Kim and F. Pellacini. Jigsaw Image Mosaics. *Computer Graphics*, Cornell University, Siggraph, 2002.
- [31] D. Mauricio. Algoritmos GRASP para el problema de Cortes. UPG - FISI, Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), 2003.
- [32] V. J. Milenkovic. A Positional-Based Physics: Simulating the Motion of Highly Interacting Spheres and Polydra. *Computer Graphics Proceedings-SIGGRAPH88*, 1988, 281-288.
- [33] L. Rivera, P. Carvalho and L. Velho. Caixas Orientadas Envolventes na Verificacao de Objetos. Technical Report TR-02-05, Nro.02, 2002.

