

Pamela Betancur Muñoz

Asesor: José Fernando Martínez C. Co asesor: Juan Fernando Duque L.

Optimización de empaques aplicando lineamientos de diseño para el **ensamble** validado en los **contextos** de empaque, transporte y desempaque

Proyecto de grado
Maestría en ingeniería
Universidad EAFIT | 2013

(Martínez, 2009)

Optimización de empaques aplicando lineamientos de diseño para el ensamble validado en los contextos de empaque, transporte y desempaque

Pamela Betancur M.
pbetancu@eafit.edu.co

Asesor:
José Fernando Martínez C.
Ingeniero Mecánico | Magíster en ingeniería

Co asesor:
Juan Fernando Duque L.
Ingeniero Mecánico | Magíster en ingeniería

UNIVERSIDAD EAFIT
Departamento de ingeniería de diseño de producto
Maestría en ingeniería
Medellín, Colombia
2013

Tabla de contenido

Glosario	5
Introducción	6
1. Capítulo 1 Definición del problema	8
1.1. Objetivos del proyecto	8
Objetivo general	8
Objetivos específicos	8
1.2. Alcance del proyecto	8
1.3. Metodología	9
1.4. Definición del problema	12
2. Capítulo 2 Estado del arte científico y tecnológico	18
2.1. Problema de corte y empaque	18
2.2. Diseño para empaque	34
3. Capítulo 3 Desarrollo del algoritmo de optimización para empaques	38
3.1. Directrices diseño para el ensamble	38
3.2. Algoritmo de optimización de empaques	40
4. Capítulo 4 Caso de estudio	46
4.1. Elección del caso de estudio	46
4.2. Desarrollo del caso de estudio	47
4.1. Resultados del caso de estudio	49
5. Conclusiones y recomendaciones	55
6. Fuentes	58
7. Anexos	6

Lista de tablas

Tabla 1 Objetivo, actividades y resultados de la Fase I de la metodología	10
Tabla 2 Objetivo, actividades y resultados de la Fase II de la metodología	11
Tabla 3 Objetivo, actividades y resultados de la Fase III de la metodología	12
Tabla 4 Funciones del empaque	13
Tabla 5 Categorías del empaque	13
Tabla 6 Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para optimización de empaques	18
Tabla 7 Clasificación de los problemas de corte y empaque según la forma de los ítems y la representación	20
Tabla 8 Clasificación de los problemas de corte y empaque.....	21
Tabla 9 Ejemplos de problemas “bin packing” y “nesting”	22
Tabla 10 Clasificación de polígonos.....	23
Tabla 11 Aplicaciones problemas “bin packing” y “nesting”	23
Tabla 12 Algoritmos para problema “bin packing”	25
Tabla 13 Ejemplo de resultados de algoritmos por capas, AD y FC	25
Tabla 14 Métodos de solución de problemas de anidamiento.....	26
Tabla 15 Algoritmos para problemas de anidamiento.....	27
Tabla 16 Aproximaciones geométricas para problemas de anidamiento.....	27
Tabla 17 Línea de tiempo para algoritmos de “bin packing” y “nesting”	30
Tabla 18 Software de optimización de telas y lámina metálica	31
Tabla 19 Software comerciales optimización 3D	32
Tabla 20 Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para patentes y/ registros	33
Tabla 21 Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para diseño para el empaque.....	34
Tabla 22 Enfoques lineamientos diseño para empaque	35
Tabla 23 Clasificación de lineamientos de diseño para el ensamble	38
Tabla 24 Premisas de diseño para empaques y restricciones para el algoritmo	40
Tabla 25 Proceso de creación del algoritmo de optimización de empaques.....	41
Tabla 26 Fases, funciones y restricciones para el algoritmo de optimización de empaques.....	42
Tabla 27 Algoritmo TP (“Touching perimeter”).....	43
Tabla 28 Descripción e implementación del algoritmo	44
Tabla 29 Funcionamiento del algoritmo desde Matlab	45
Tabla 30 Proceso de elaboración del caso de estudio	46
Tabla 31 Caja y piezas vajilla con sub empaque	47
Tabla 32 Proceso de diseño de empaques utilizando el algoritmo de optimización	48
Tabla 33 Metodología propuesta para la optimización y diseño de empaques	50
Tabla 34 Análisis empaque existente y propuestos	51

Lista de figuras

Figura 1 Fases de la metodología y objetivos relacionados	9
Figura 2 Rellenos para proteger los productos	16
Figura 3 Fragmento del “corpus” de artículos de optimización de empaques	19
Figura 4 Dinámica de enfoques artículos optimización de empaques.....	19
Figura 5 Dinámica de artículos de optimización de empaques.....	20
Figura 6 Proceso de solución de problemas de corte y empaque	24
Figura 7 Cantidad de artículos por categoría	28
Figura 8 Cantidad de algoritmos por categoría (problema “bin packing”)	28
Figura 9 Cantidad de algoritmos por categoría (problemas de anidamiento)	29
Figura 10 Base de datos patentes software de optimización de empaques.....	33
Figura 11 “Corpus” artículos de diseño para el empaque.....	35
Figura 12 Enfoque y línea de tiempo de artículos relacionados con diseño para el empaque.....	36
Figura 13 Analogías directrices diseño para el ensamble	39
Figura 14 Consumo de cartón	52
Figura 15 Cantidad de cajas por contenedor	52
Figura 16 Tiempo de empaque.....	52
Figura 17 Unidades producidas vs. Costo del material	53
Figura 18 Unidades producidas vs. Costo del transporte.....	53
Figura 19 Unidades producidas vs. Costo de la mano de obra de empaque	54

Lista de anexos

Anexo 1 | Base de datos de artículos de optimización de empaques

Anexo 2 | Base de datos patentes software de optimización de empaques.....

Anexo 3 | Base de datos artículos de diseño para el empaque.....

Anexo 4 | Analogías directrices diseño para el ensamble

Anexo 5 | Instructivos para ensayo de empaque

Agradecimiento

Agradezco a quienes me apoyaron durante todo este tiempo en el desarrollo de la maestría y el presente proyecto. A mi familia, a Juan Diego Quintero y a mis amigas Laura Alzate y Sofía Henao. Además, a quienes participaron en el desarrollo de las actividades de este: Ana María Jaramillo, Camilo Sánchez, Inghry Toscano, David Franco y Paula Chacón.

Agradezco especialmente a mis asesores. A José Fernando Martínez por cada una de sus enseñanzas, por su perseverancia, paciencia, compromiso y acompañamiento durante todo el proceso de la Maestría. A Juan Fernando Duque por su dedicación, por apasionarse con este tema y por preocuparse siempre por mi aprendizaje.

Glosario

Diseño para el ensamble: Son una serie de lineamientos que buscan guiar el proceso de diseño para facilitar, optimizar y garantizar la confiabilidad del ensamble. Surgen para facilitar la racionalización de los procesos de ensamble, lo cual comprende mejoras en la efectividad de este, en la calidad del producto y en el contexto mismo del sistema de ensamble (Andreassen, 1983).

Polígonos convexos: Son polígonos cuyos ángulos interiores miden menos de 180° y todas las diagonales trazadas entre los puntos que lo componen son interiores.

“Bin packing problem” o problema de empaque en cajas o contenedores: Está relacionado con problemas en los que dados una serie de ítems rectangulares y un número finito de grandes objetos: hojas, cajas o contenedores; se busca ubicar los ítems sin que se sobre-pongan (Lodi & otros, 2002).

“Nesting problems” o problemas de anidamiento: Este concepto está relacionado con problemas donde un número de piezas o ítems de geometría irregular deben ser ubicados en una banda rectangular y su longitud debe ser minimizada sin que las piezas de sobre-pongan (Jens, Benny K., & Allan, 2004), o donde más de una pieza de forma irregular debe ser ubicada en una configuración con otras piezas con el fin de optimizar un objetivo (Bennell & Oliveira, 2006)

“Convex hull” o envolvente convexa: La envolvente convexa de un conjunto de puntos, es el polígono convexo de menor tamaño, que incluye todos los puntos del conjunto.

“Bounding box” o caja contenedora: El “*bounding box*” de un conjunto de puntos es la caja de menor volumen donde se encuentran contenidos todos los puntos del conjunto.

Algoritmo “touching perimeter”: Algoritmo de optimización para el problema de corte y empaque propuesto por Lodi & otros (2002), que consiste en maximizar el contacto de las piezas que se ingresan al contenedor, calculando el porcentaje del perímetro de esta que hace contacto con las piezas previamente ingresadas o con los ejes el contenedor mismo.

Algoritmo “object weight based layered touching perimeter”: Este hace referencia al algoritmo propuesto de optimización de empaques. Recibe este nombre porque tiene como restricción el peso de las piezas, la distribución en el empaque es por capas y está basado en el algoritmo “*touching perimeter*”.

“Bin” o capa: En el algoritmo propuesto “*object weight based layered touching perimeter*”, los “*bin*” son cada una de las capas que se van creando para ubicar los ítems o piezas en el contenedor.

Introducción

Un empaque es un sistema diseñado para mantener las mercancías seguras, para que su manejo, transporte, distribución, consumo, reutilización o eliminación sea efectivo y eficiente (Saghir, 2004; Huang, 2012) permitiendo a la vez maximizar el valor para el consumidor y promover la marca del producto que contiene (Simms & Trott, 2010).

Las actividades relacionadas con los empaques son frecuentemente percibidas como un costo más que como un valor agregado, a pesar de la importancia del empaque en la estrategia de negocio (Azzi & otros, 2012). Tradicionalmente, el diseño del empaque ha tenido un rol subordinado respecto al diseño del producto y al diseño del sistema de producción; sin embargo, sus múltiples funciones, algunas mencionadas en el párrafo anterior, hacen que sea de gran impacto para el costo de la cadena de distribución.

Los tres componentes de más peso en el costo del empaque son la mano de obra, los equipos y los materiales. En el empaque manual, sólo la mano de obra y los materiales son significativos. Aproximadamente el 9% del costo total de cualquier producto es el empaque, lo que se ve reflejado en el precio de venta (Lee & Lye, 2003). La manufactura, uso y eliminación del empaque representan hasta el 60% de los costos de producción. Por otro lado, los materiales de empaque constituyen hasta el 65% de los desechos sólidos mundiales (Lee & Lye, 2003), lo que implica, además de un impacto en el costo final del producto y en la logística, un impacto ambiental.

Debido a lo anterior, muchas empresas manufactureras se han visto forzadas a ejercer acciones para moderar el uso de empaques (Chena & otros, 2011) y la atención prestada a este tema se ha incrementado, no solo en la industria, sino también en la comunidad científica, pero la mayor atención se ha puesto en las actividades externas de logística como transporte, carga de contenedores, consolidación de paletizado, entre otros. La mayoría de los autores parecen ignorar el hecho de que muchas ineficiencias pueden atribuirse al diseño de empaques como tal (Azzi & otros, 2012) y a no tener una concepción del problema del empaque durante todo su ciclo de vida.

Considerando lo expuesto anteriormente, mediante el presente proyecto se propone un acercamiento al diseño integral de empaques mediante la solución del problema de optimización de espacio de almacenamiento y consumo de material, restringido por los lineamientos de diseño para el ensamble y demás requerimientos que garanticen mantener la calidad de las piezas en contextos claves del ciclo de vida, como son: empaque, transporte y desempaque.

Establecer el estado del arte científico y tecnológico, desarrollar un algoritmo de optimización de empaques basado en técnicas de optimización y lineamientos de diseño para el ensamble y evaluar el impacto de la optimización en un caso de estudio para determinar la aplicabilidad en un contexto industrial, fueron los objetivos del proyecto. Para el logro de estos, se planteó una

metodología cuyas fases fueron: exploración, desarrollo e implementación. Cada una está relacionada con un objetivo específico y a su vez con un capítulo de la presente monografía.

En el primer capítulo se presenta la definición del problema. En el segundo, el estado del arte de optimización y de lineamientos de diseño para empaques. En la búsqueda del estado del arte de optimización, se encontró que existen diferentes acercamientos para el aprovechamiento del espacio. Este problema ha sido abordado no solo para el tema de empaque sino también para el de corte, ya que se asemejan en su planteamiento. Además, se encontraron algunos software comerciales para optimizar pallets, contenedores y corte de textiles, lámina metálica y madera.

En la búsqueda de lineamientos de diseño para empaques se encontró que en la literatura se proponen algunas guías para el diseño de empaques, pero enfocados en el área de mercadeo y en el diseño sostenible. Sin embargo, se encontró un artículo donde se propone una metodología llamada “diseño para el empaque manual” (DFPkg), la cual está basada en diseño para el ensamble.

En el tercer capítulo, se encuentran los lineamientos de diseño para el fácil empaque y desempaque, los cuales fueron resultado de analogías creadas a partir de las directrices de diseño para el ensamble y “diseño para el empaque manual”.

Además, se documentó el proceso de programación del algoritmo de optimización, cuyas restricciones se derivaron del alcance, objetivos del proyecto y directrices de diseño para el empaque. En este desarrollo se tuvieron en cuenta los análisis del estado del arte, los cuales determinan cuáles algoritmos han sido utilizados en los últimos años, la cantidad de información disponible sobre estos y la velocidad de implementación.

Por último, en el cuarto capítulo, se encuentra un caso de estudio para probar el algoritmo de optimización, el proceso de diseño del nuevo empaque y la viabilidad de esta solución comparándola con la existente.

El caso de estudio elegido, fue el empaque de una vajilla de cerámica. Este producto cumple con las restricciones tenidas en cuenta en la programación del algoritmo, ya que se compone por piezas frágiles que deben estar separadas entre ellas por capas de algún material que las proteja.

Se documentó el proceso que se llevó a cabo para el diseño de dos posibles nuevos empaques, partiendo de la modelación en un software CAD de cada grupo de piezas, hasta el diseño de los empaques y las piezas de protección. Al final se encuentra el análisis de estos en los contextos de empaque y transporte y el cálculo de consumo de material, los cuales permiten evaluar si la solución es viable en la industria.

Palabras clave: Diseño para el ensamble (DFA), Diseño para empaques (DFP), Optimización, Empaque, Algoritmo “touching perimeter”, Algoritmo “object weight based touching perimeter”.

1. Capítulo 1 | Definición del problema

1.1. Objetivos del proyecto

Objetivo general

Desarrollar y evaluar un algoritmo de optimización de sistemas de almacenamiento y consumo de material, aplicando técnicas de optimización, lineamientos de diseño para el ensamble aplicados a empaques y análisis en los contextos de empaque, transporte y desempaque que permitan presentar una solución para la industria.

Objetivos específicos

- A. Establecer el estado del arte científico y tecnológico sobre optimización de sistemas de almacenamiento y lineamientos de diseño para empaques a través de rutas tecnológicas y revisión de artículos científicos, con el fin de conocer los avances existentes.
- B. Determinar los lineamientos de diseño para empaques a tener en cuenta en la solución del problema de optimización de sistemas de almacenamiento, basado en las directrices de diseño para el ensamble.
- C. Desarrollar y evaluar un algoritmo mediante funciones nuevas o existentes que permita minimizar volúmenes de sistemas de almacenamiento.
- D. Evaluar el impacto de la optimización de sistemas de almacenamiento en los contextos de empaque, transporte y desempaque mediante un caso de estudio para determinar aplicabilidad en un contexto industrial.

1.2. Alcance del proyecto

El alcance del presente proyecto consistió en realizar una investigación aplicada implementando una metodología que comprende el uso de técnicas de optimización y DFA (Diseño para el ensamble) para el desarrollo de un algoritmo de optimización de sistemas de almacenamiento de piezas convexas y su posterior validación.

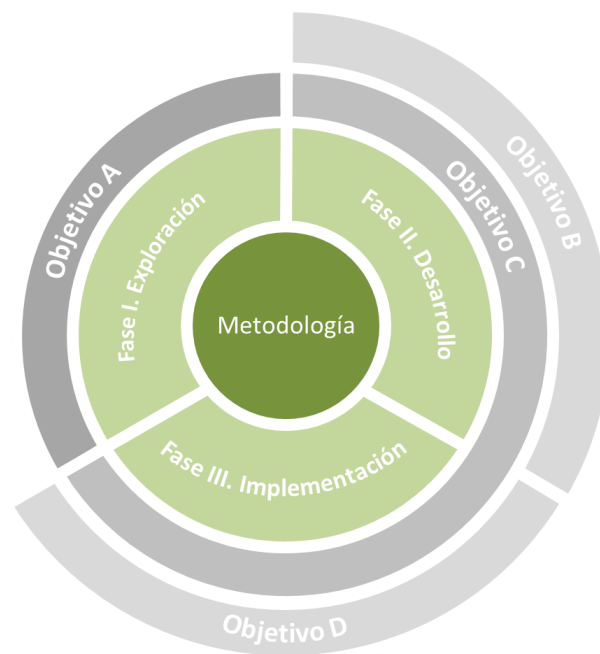
Los siguientes son los entregables del proyecto:

- Algoritmo de optimización de sistemas de almacenamiento de piezas convexas cuyas restricciones son lineamientos de diseño para empaques basados en diseño para el ensamble (DFA).
- Monografía con los resultados del proyecto, el algoritmo documentado y un informe de validación de los resultados de este para determinar su impacto en la industria y si es la mejor práctica de empaque.

1.3. Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, comprende tres fases o etapas planteadas por Martínez (2009); exploración, desarrollo e implementación. Como se ilustra en la Figura 1, cada etapa se relacionó con un objetivo específico del proyecto (Ver numeral 1.1 Pág. 8)

Figura 1 | Fases de la metodología y objetivos relacionados



Fuente: Elaboración propia

Fase I. Exploración. El objetivo específico relacionado con esta fase es el A. En esta fase se realizó una búsqueda de información del estado del arte científico y tecnológico asociado al proyecto.

Para la revisión de estado del arte, primero se identificaron los dos temas fundamentales para el desarrollo del proyecto: el problema de optimización de corte y empaque (espacio de almacenamiento) y lineamientos o metodologías existentes de diseño de empaques. Con estos dos temas identificados, se siguió la metodología propuesta por Malaver, F. y Vargas, M. (2007) para búsqueda, análisis e interpretación de la información en vigilancia tecnológica, pero aplicada al análisis del estado del arte. Esta se dividió en esas mismas tres etapas, con las siguientes actividades (ver Columna “Actividades” Tabla 1).

La búsqueda de información se realizó siguiendo los siguientes pasos: identificar palabras clave, identificar las fuentes de información relevantes, formular ecuaciones de búsqueda y elaborar los “corpus” de la investigación a partir de los resultados arrojados en las consultas realizadas utilizando las ecuaciones de búsqueda definidas.

Tabla 1 | Objetivo, actividades y resultados de la Fase I de la metodología

Fase I		
Objetivo	Actividades	Resultados
Establecer el estado del arte científico y tecnológico sobre optimización de sistemas de almacenamiento a través de rutas tecnológicas y revisión de artículos científicos, con el fin de conocer los avances existentes.	Búsqueda Identificación de las palabras clave y fuentes de información relevantes. Formulación de las ecuaciones de búsqueda. Elaboración de las bases de datos.	Documento con el análisis de la información encontrada en el estado del arte científico y tecnológico
	Análisis Consultas convencionales a los corpus (asociado a desarrollo científico)	
	Interpretación Inteligencia (interpretación de los resultados)	

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el análisis, se procesó y analizó la información que contienen los “corpus” elaborados, teniendo en cuenta los títulos, abstract y palabras clave; y se generaron indicadores para su posterior discusión, tales como: número de artículos por año registrados en la base de datos y temas principales tratados en cada artículo o enfoque dado a la temática correspondiente, ya sea para lineamientos o metodologías existentes de diseño de empaques o para el problema de optimización de corte y empaque.

Por último, en la parte de interpretación, se documentó la información encontrada y analizó el interés en el área a través del tiempo y la necesidad de profundizar en algunos temas que aún no han sido abordados. Además, los artículos relevantes fueron leídos detenidamente y se documentaron los hallazgos y la información de importancia para el proyecto.

Fase II. Desarrollo. Los objetivos específicos relacionados con esta fase son el B y el C. Durante esta fase se estudiaron los lineamientos de diseño para el ensamble propuestos por Boothroyd, G., Dewhurst, P. (2002), Pahl, G., Beitz, W. (2007) y Andreassen, M., Myrup, S. (1983) y se hizo una adaptación mediante analogías nuevas o existentes, que permitiera su utilización en diseño para empaque. Además, se desarrolló un algoritmo de optimización de empaques basado en los acercamientos a la solución de este tipo de problemas encontrados en el estado del arte. La herramienta utilizada para la programación fue el software de Mathworks, Matlab. La síntesis de esta fase puede verse en la Tabla 2.

Para el desarrollo del algoritmo, primero se identificaron en términos computacionales, las restricciones que debían respetarse de los lineamientos de diseño para empaques. Posteriormente, se listaron las funciones que debían ser ejecutadas en cada una de las fases identificadas en el estado del arte para la solución de este tipo de problemas: representación, clasificación, manipulación, ubicación y optimización.

Tabla 2 | Objetivo, actividades y resultados de la Fase II de la metodología

Fase II		
Objetivo	Actividades	Resultados
Determinar los lineamientos de diseño para empaques a tener en cuenta en la solución del problema de optimización de sistemas de almacenamiento, basado en las directrices de diseño para el ensamble.	Documentar lineamientos de DFA Adaptación de lineamientos de DFA para DFP	Lineamientos de DFP para ser aplicados en el algoritmo de optimización de empaques.
Desarrollar un algoritmo mediante funciones nuevas o existentes que permita minimizar volúmenes de sistemas de almacenamiento de piezas convexas.	Algoritmo de optimización de empaques. Herramienta: Matlab	Algoritmo de optimización de empaques.

Fuente: Elaboración propia

Se hizo una búsqueda de algoritmos existentes para cada una de esas funciones, mediante la información de la base de datos de artículos científicos del estado del arte y búsquedas adicionales en bases de datos.

Para la elección de los algoritmos a implementar se tuvieron en cuenta los análisis que determinan cuáles algoritmos han sido utilizados en los últimos años, la cantidad de información disponible sobre estos y la velocidad de implementación. Finalmente, se desarrolló el algoritmo de optimización con restricciones de diseño para empaques.

Fase III. Implementación. Los objetivos específicos relacionados con esta fase son el C y el D. En esta se implementaron las restricciones de diseño para el empaque en el algoritmo de optimización desarrollado y se evaluaron y documentaron los resultados de este en un caso de estudio para determinar su aplicabilidad. La síntesis de esta fase puede verse en la Tabla 3.

El proceso de implementación de los lineamientos de diseño para empaques en el algoritmo, se ejecutó desde el inicio de la programación del algoritmo en la Fase II. Para la evaluación del impacto de este en la industria, se identificaron algunos productos que requieran este tipo de soluciones y se eligió un caso. Para este, se corrió el algoritmo, y a partir de las soluciones entregada por este se diseñaron dos empaques para el producto y se documentaron los pasos que se siguieron. Finalmente, se compararon los resultados de volumen y consumo de material con la solución actual y se evaluaron en los contextos de empaque, transporte y desempaqué.

Tabla 3 | Objetivo, actividades y resultados de la Fase III de la metodología

Fase III		
Objetivos	Actividades	Resultados
Desarrollar un algoritmo mediante funciones nuevas o existentes que permita minimizar volúmenes de sistemas de almacenamiento de piezas convexas.	Implementan las restricciones de DFP en el algoritmo de optimización desarrollado	Algoritmo con restricciones de DFP
Evaluar el impacto de la optimización de sistemas de almacenamiento en los contextos de empaque, transporte y desempaqué mediante un caso de estudio para determinar aplicabilidad en un contexto industrial.	Evaluar en un caso de estudio los resultados del algoritmo	Documento con resultados de la evaluación del algoritmo que determinen su aplicabilidad

Fuente: Elaboración propia

1.4. Definición del problema

Un empaque es un sistema diseñado para mantener las mercancías seguras, para que su manejo, transporte, distribución, almacenamiento, venta al por menor, consumo, recuperación, reutilización o eliminación, sea efectivo y eficiente (Saghir, 2004; Huang, 2012) permitiendo a la vez maximizar el valor para el consumidor, promover la marca, informar e instruir al consumidor, vender el mismo producto en diferentes tamaños y promover la higiene y la seguridad (Simms & Trott, 2010). Además, el empaque influye en la efectividad de la cadena de suministro, al ser la interface entre esta y el usuario final (Saghir, 2004). Sin embargo, por encima de todo esto está su función principal: proteger, contener y preservar el producto. Las funciones del empaque,

entonces, son múltiples y complejas (Saghir, 2004) (Ver Tabla 4). Sin él, el manejo y comercialización de los productos sería difícil, ineficiente y costoso (Simms & Trott, 2010).

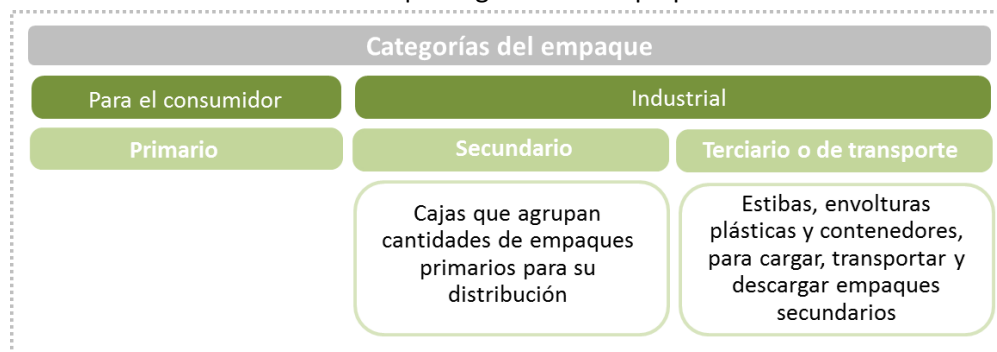
Tabla 4 | Funciones del empaque



Adaptado de: Lee & Lye (2003)

En general, el estudio del empaque puede dividirse en dos categorías según el uso: empaque para el consumidor y empaque industrial. Independientemente del tipo, el empaque no debe solo proteger, contener y transportar productos, sino también promocionarlos y hacerlos atractivos (Yiangkamolsing & otros, 2010). El empaque para el consumidor es también llamado empaque primario, y el industrial, secundario o terciario. El empaque secundario es un término usado para las cajas que agrupan cantidades de empaques primarios para su distribución. El empaque terciario o de transporte se refiere a las estibas, envolturas plásticas y contenedores, para cargar, transportar y descargar empaques secundarios (Huang, 2012) (Ver Tabla 5).

Tabla 5 | Categorías del empaque



Fuente: Elaboración propia

Las actividades de empaque son frecuentemente percibidas como un costo, más que como un valor agregado; aunque muchos autores enfatizan en la importancia del empaque en la estrategia de negocio y sostienen que su papel en la industria sigue creciendo, debido al incremento en los costos logísticos (Azzi & otros, 2012). Tradicionalmente, el diseño del empaque ha tenido un rol subordinado respecto al diseño del producto y al diseño del sistema de producción; sin embargo, sus múltiples funciones hacen que sea de gran impacto para el costo de la cadena de distribución; un papel estratégico que sólo en los últimos años se le ha reconocido, en la academia y en la industria (Azzi & otros, 2012).

En el mundo académico, hasta ahora, el impacto de los sistemas de empaque en los procesos de logística está a menudo implícito y es casi ignorado (Azzi & otros, 2012), a pesar de que los problemas son evidentes y se encuentran identificados.

Por ejemplo, en algunas empresas de manufactura, existen problemas logísticos como el sobre-empaque. Este ocurre cuando se usa más cantidad de cajas de las requeridas, cuando se utilizan volúmenes mayores a los necesarios –resultando en un desperdicio de espacio- o cuando se usa una caja de alta resistencia siendo suficiente una de baja. Otro problema es la gran cantidad de trabajo manual vinculado a la logística; el uso frecuente de formas de transporte donde no hay suficiente cuidado de los productos y los procesos de cargue y descargue (Chena & otros, 2011).

Los tres componentes de más peso en el costo del empaque son la mano de obra, los equipos y los materiales. En el empaque manual, solo la mano de obra y los materiales son significativos. Aproximadamente el 9% del costo total de cualquier producto es el empaque, lo que se ve reflejado en el precio de venta, y alrededor del 90% de ese costo debe ser atribuido a factores diferentes al material (Lee & Lye, 2003).

La manufactura, uso y eliminación del empaque representa hasta el 60% de los costos de producción. Por otro lado, los materiales de empaque constituyen hasta el 65% de los desechos sólidos mundiales (Lee & Lye, 2003), lo que implica, además de un impacto en el costo final del producto y en la logística, un impacto ambiental.

Debido a lo anterior, muchas empresas manufactureras se han visto forzadas a ejercer acciones para moderar el uso de empaques (Chena & otros, 2011) y la atención prestada a este tema se ha incrementado, no sólo en la industria, sino también en la comunidad científica. Diferentes autores resaltan la estrecha relación entre los conceptos de logística y empaque, y afirman que las sinergias alcanzadas al integrarlos llevan al crecimiento potencial de la efectividad y eficiencia de la cadena de distribución. De ahí que se haya desarrollado un nuevo concepto en los últimos años: la logística de empaques (Azzi & otros, 2012).

La logística planea, implementa y controla, y el empaque contiene, protege, asegura, promueve, vende, informa y es una fuente de beneficios. La logística de empaques aborda las interfaces de

los dos sistemas enfocándose en el empaque, y buscando aumentar la eficiencia y la eficacia del sistema combinado, desde el punto de origen hasta el punto de consumo, y teniendo también en cuenta los procesos de reutilización o eliminación (Saghir, 2004).

Numerosos casos de estudio presentados en la literatura proveen evidencia empírica de los beneficios obtenidos por esta integración de logística y diseño de empaques, sin embargo, la mayor atención se ha puesto en las actividades externas de logística como transportes, carga de contenedores, consolidación de paletizado, entre otros. La mayoría de los autores parecen ignorar el hecho de que muchas ineficiencias pueden atribuirse al diseño de empaques como tal y a no tener una concepción del problema del empaque durante todo el ciclo de vida de este. Algunos de los problemas que obedecen a esta situación son la necesidad de re-empacar para encajar en la estantería de un almacén o el tener que dejar unidades empacadas en el suelo por su incompatibilidad con el tamaño de la estantería (Azzi & otros, 2012).

Varios factores afectan el empaque: la geometría de el/los elementos a empacar, la naturaleza del material de empaque utilizado y sus costos. La efectividad en el empaque de productos no depende solo del volumen del material utilizado y de la mano de obra, sino también de otros factores como el diseño del empaque (Lee & Lye, 2003). Un mejor empaque, sin duda, puede ser una manera de disminuir costos innecesarios; lo que no está solo relacionado con los materiales utilizados o con los procesos logísticos, sino también con un diseño pensado para los procesos de manufactura, las relaciones de la cadena de suministros, los costos medioambientales y otros costos ocultos asociados a la ergonomía, la pérdida de ventas, entre otros (Azzi & otros, 2012). Debido a que la obtención de beneficios es el mayor objetivo de las industrias, la viabilidad económica de las nuevas soluciones de embalaje es fundamental (Azzi & otros, 2012).

A pesar de que muchos de los problemas relacionados con el empaque y sus soluciones ya se han citado, el avance de las investigaciones existentes en diseño de empaques ilustra problemas diferentes que no se han abordado previamente en la literatura, por lo menos no con un enfoque integrado.

Con base en esto Azzi, A. y otros (2012) proponen las siguientes líneas de trabajo para futuras investigaciones:

(i) La identificación de métodos y procedimientos para un diseño de empaques sistémico e integral, ya que existe el interés por desarrollar una estrategia que integre los factores principales y la necesidad de un acercamiento multi-criterio que permita lograr una configuración de empaque considerando las sinergias entre procesos; lo que llevaría a un empaque final que no es sólo seguro, sino comunicativo, eficiente para su manipulación y sensible a los aspectos económicos, sociales y medioambientales. En este contexto, el desarrollo de un software para el diseño integral de empaques sería útil, y la creación de parámetros y procedimientos multi-criterio para el diseño de empaques sería un desafío.

(ii) Se requiere investigación para evaluar y ponderar los diferentes factores que afectan el diseño de empaques y proveer lineamientos que guíen la toma de decisiones en el proceso de diseño.

(iii) Se necesita más investigación para identificar y describir las oportunidades y obstáculos en la cadena de abastecimiento y los procesos de cambio en la logística de empaques, y para analizar la estandarización de empaques dirigida a la integración con la cadena, teniendo en cuenta el sistema y un enfoque de diseño holístico.

El presente proyecto busca proponer un acercamiento a lo propuesto por Azzi, A. y otros (2012) a partir de uno de sus lineamientos para futuras investigaciones, y teniendo en cuenta las sinergias entre procesos. Este primer acercamiento consiste en integrar los diferentes requerimientos de diseño que se evidencian en algunos de los procesos que intervienen en el ciclo del empaque, entre ellos el de mantener la integridad y calidad de las piezas, y proporcionar lineamientos para la planeación del empaque y desempaqué, y para la optimización del espacio.

Para el requerimiento de diseño de mantener la integridad y calidad de las piezas, se encontró que la caja de cartón corrugada es aplicada por su buen cierre, ventajas de amortiguación y anti-vibración, (Chena & otros, 2011). Además en la búsqueda de productos existentes se evidenció el uso de diferentes materiales de relleno compacto como espumas y bolsas de aire y relleno suelto como papel y poliestireno expandido, además el uso de divisiones en cartón corrugado. Estas se pueden ver en la Figura 2.

Figura 2 | Rellenos para proteger los productos



Fuente: Elaboración Propia a partir de imágenes tomadas de internet¹

En la búsqueda de lineamientos para una planeación del empaque y desempaqué se encontró que en la literatura se proponen algunas guías para el diseño de empaques, pero enfocados en el área de mercadeo y en el diseño sostenible. Sin embargo, Lee & Lye (2003), proponen una metodología de diseño de empaques llamada “diseño para el empaque manual” (DFPkg).

Esta metodología tiene elementos de diseño para el medio ambiente (DFEnv) y diseño para el ensamble (DFA). Mediante el DFEEnv, se reconoce el impacto de los materiales de empaque y prácticas no amigables con el medio ambiente, y el DFA se incorpora debido a que las operaciones de empaque son similares a las de ensamble de partes y los principios básicos de ensamble se

¹ Ver 6. Fuentes

pueden aplicar al empaque. Cabe anotar que la dificultad del empaque es menor que la del ensamble y debido a esto, este proceso toma menos tiempos que el de ensamble (Lee & Lye, 2003).

Finalmente, para optimizar espacio de almacenamiento, se ha encontrado en la literatura que existen diferentes acercamientos para el aprovechamiento del espacio. Este problema ha sido abordado no sólo para el tema de empaque sino también para el de corte, ya que se asemejan en su planteamiento.

Estos problemas y específicamente los de piezas irregulares son importantes y tienen una gran variedad de aplicaciones industriales. Estas incluyen manufactura de textiles, mobiliario, calzado y corte de lámina metálica (Bennell & Oliveira, 2006). Otras aplicaciones involucran problemas de geometrías 3D, como empaque de pastillas, empaque de cajas y barriles en un contenedor y corte láser 3D, entre otros (John K. & George K.). Usualmente el objetivo es disminuir el desperdicio, debido a esto su impacto económico y medioambiental (Gomes & Oliveira, 2004).

A pesar de su relevancia en la industria, las publicaciones científicas de optimización de espacio son relativamente pocas comparadas con otros problemas de corte y empaque. Una explicación a esto es la dificultad percibida y el tiempo que debe invertirse para desarrollar una herramienta geométrica que evalúe las soluciones generadas por computador (Bennell & Oliveira, 2006), cabe señalar que existe una corriente suficientemente grande de las publicaciones referentes a los problemas de empaque de paralelepípedos, pero, existen pocas investigaciones relacionadas con el problema de ubicación de objetos geométricos en 3 dimensiones, así este problema tenga un gran valor aplicado (Stoyan, s.f), sin embargo el número de publicaciones en esta área ha incrementado considerablemente en las últimas dos décadas (Wäscher, Heike, & Holger, 2004).

Considerando los antecedentes presentados y teniendo en cuenta las líneas de investigación propuestas por Azzi, A. y otros (2012), se propuso un acercamiento al diseño de empaques integral mediante la solución del problema de optimización de espacio de almacenamiento, restringido por los lineamientos de diseño para el ensamble y demás requerimientos que garanticen mantener la calidad de las piezas en los contextos de empaque, transporte y desempaque.

2. Capítulo 2 | Estado del arte científico y tecnológico

2.1. Problema de corte y empaque

Para el primer tema identificado, problema de optimización de corte y empaque se realizó una búsqueda de estado del arte científico y tecnológico.

Para el estado del arte científico, se buscaron artículos en las bases de datos SCOPUS y Engineering Village, con una ventana de observación de 23 años (Desde Enero de 1990 hasta Marzo de 2013), para la cual se utilizaron las palabras clave y ecuaciones de búsqueda que se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6 | Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para optimización de empaques

Palabras clave	Ecuaciones de búsqueda
Packing + optimization	TITLE-ABS-KEY(packing optimization)
bin + packing + problem	TITLE(bin packing problem)
3D + nesting + packaging	(TITLE-ABS-KEY(3d) AND TITLE-ABS-KEY(nesting) AND TITLE-ABS-KEY(packing))
Three + dimensional + nesting + packgking	(TITLE-ABS-KEY(three dimensional) AND TITLE-ABS-KEY(nesting) AND TITLE-ABS-KEY(packing))
3 dimensional + nesting + packing	(TITLE-ABS-KEY(3 dimensional) AND TITLE-ABS-KEY(nesting) AND TITLE-ABS-KEY(packing))
3 dimension + nesting	(TITLE-ABS-KEY(3 dimension) AND TITLE-ABS-KEY(nesting))
Three + dimension + nesting	(TITLE-ABS-KEY(three dimension) AND TITLE-ABS-KEY(nesting))
3d + nest*	TITLE-ABS-KEY(3dnest*)
3d + nest* + algorithm	(TITLE-ABS-KEY(3d nest*) AND TITLE-ABS-KEY(algorithm)) (((3d nest) WN All fields) AND ((algorithm) WN All fields))

Fuente: elaboración propia

Se encontraron 831 artículos, de los cuales 85 fueron elegidos según la información encontrada en los títulos y el abstract y fueron documentados en un “corpus” como se muestra en la Figura 3, además se clasificaron dependiendo del tipo de representación del problema, en el plano - en dos dimensiones- o en el espacio -en tres dimensiones- (Ver Anexo 1).

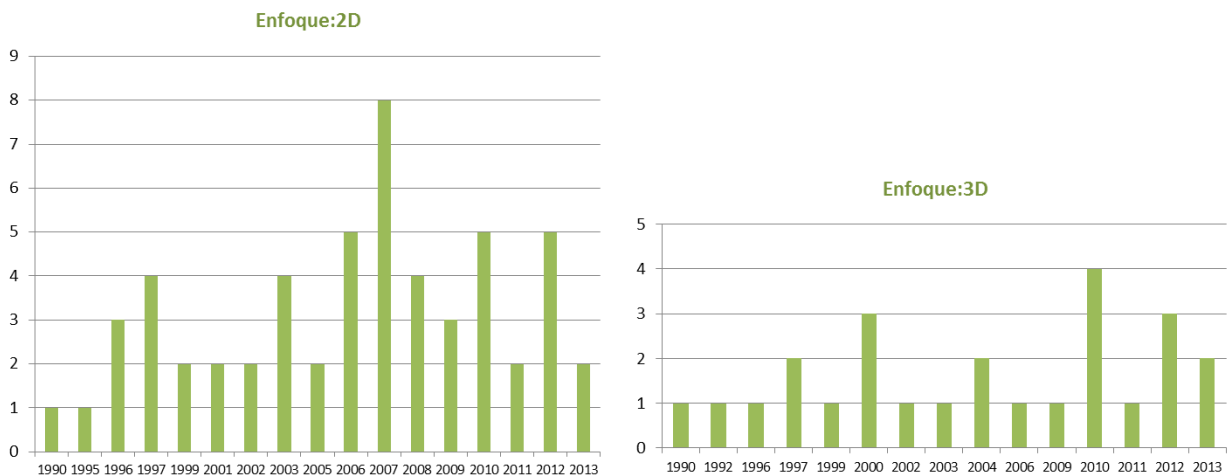
Figura 3 | Fragmento del “corpus” de artículos de optimización de empaques

#	Ecuación de búsqueda	Link	Enfoque	Nombre del artículo	Revista/congreso	Autor	Año	Abstract
1	(TITLE-ABS-KEY(nesting) AND TITLE-ABS-KEY(packng))	http://www.2D	2D	Irregular packing using the line and arc no-fit polygon	Operations Res	E. K. Burke (ekt)	2008	The no-fit polygon is a ge
2		http://www.2D	2D	A beam search implementation for the irregular shape packing problem	Journal of Heur	Julia A. Bennell	2010	This paper investigates th
3		http://www.2D	2D	Genetic algorithms and heuristic rules for solving the nesting problem in the	Systems and C	Roberto Selow	2008	The cutting/nesting probl
4		http://www.2D-3D	2D-3D	The geometry of nesting problems: A tutorial	rational Resea	Julia A. Bennell	2006	Cutting and packing probl

Fuente: Elaboración propia

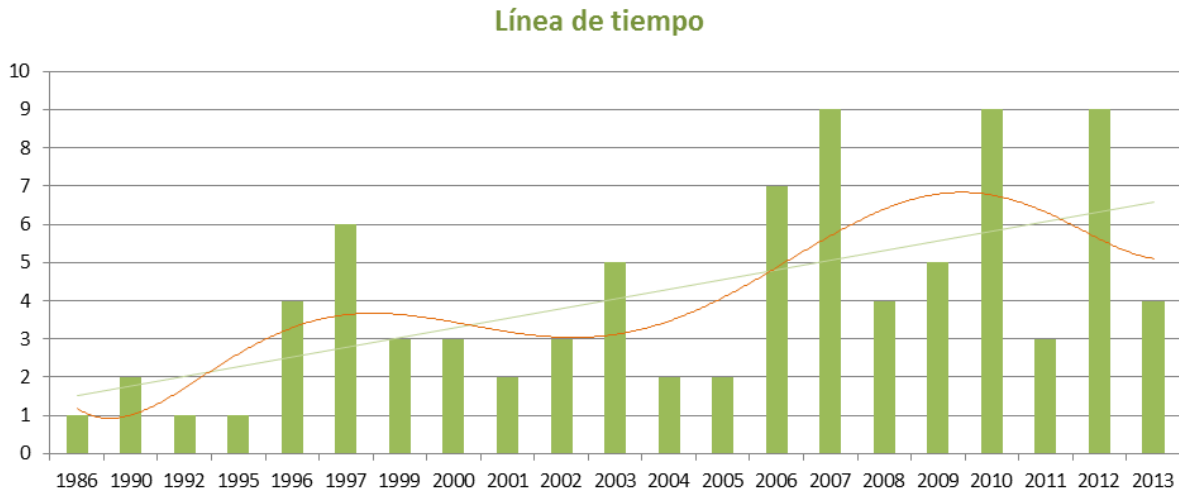
En la Figura 4 se representa el interés a través del tiempo en los problemas de optimización de empaques en dos y tres dimensiones y en la Figura 5 se encuentra consolidado el interés en el tipo de problemas de optimización independiente del enfoque. En estas se puede observar que son relativamente pocas las publicaciones que se han hecho a través del tiempo, que siempre se han tratado en paralelo los dos enfoques y que la tendencia del interés en el área es cíclica, pero creciente; solo en algunos años aumenta el número de publicaciones, con un máximo de 8 publicaciones y un promedio de 4 publicaciones al año por la comunidad científica.

Figura 4 | Dinámica de enfoques artículos optimización de empaques



Fuente: Elaboración propia

Figura 5 | Dinámica de artículos de optimización de empaques



Fuente: elaboración propia

En los artículos seleccionados, se encontró que los problemas de optimización de empaques son tratados frecuentemente en conjunto con los problemas de corte, ya que su optimización y planteamiento son matemáticamente equivalentes. Son además conocidos en la literatura científica, como el “problema de corte y empaque” (C&P por sus siglas en inglés), problemas de anidamiento o “*nesting problems*” (Chernov, Stoyan, & Romanov; Bennell & Oliveira, 2006; Egeblad, Nielsen, & Odgaard, 2006; Gerhard, Haußner, & Schumann, 2006).

Los problemas de corte y empaque están clasificados según diversos criterios, el primero es el citado anteriormente, que depende de la dimensionalidad o el tipo de representación del problema (dos o tres dimensiones) y el segundo criterio es la forma de los ítems a empacar. Cuando las formas son rectángulos se le llama empaque regular o de rectángulos y si son polígonos o formas arbitrarias el problema es llamado empaque irregular (Imahori & otros, 2006; Bennell & Oliveira, 2006). Ver Tabla 7.

Tabla 7 | Clasificación de los problemas de corte y empaque según la forma de los ítems y la representación

Problema de corte y empaque Clasificación			
Según la forma de los ítems	Empaque Rectangular	Empaque Irregular	
Según la representación	2D (Plano)	3D (Espacio)	2D (Plano)
		3D (Espacio)	

Fuente: Elaboración propia. Basado en: Imahori y otros (2006)

Dyckhoff (1990) presenta una clasificación más completa, en la cual hay 4 criterios fundamentales: representación, objetivo, grandes objetos e ítems. El criterio representación está dividida en una,

dos, tres y n-dimensiones (para $n > 3$). El tipo de objetivo puede ser de minimización, que consiste en minimizar el desperdicio de material, o de maximización, que busca aumentar el porcentaje de piezas ubicadas. Los grandes objetos son la hoja o el volumen donde se van a ubicar las piezas, y pueden ser únicas, múltiples e idénticas o múltiples y diferentes. Finalmente, los ítems son las piezas a ubicar, las cuales se clasifican según la cantidad y el nivel de homogeneidad (Bennell & Oliveira, 2006).

Esta tipología fue revisada por Wäscher y otros (2005), con el fin de aclarar algunas ambigüedades presentes en la clasificación anterior. Esta conserva las categorías de representación y el objetivo, pero se redefinen las categorías de grandes objetos e ítems, clasificando esta última también por su forma (Bennell & Oliveira, 2006). Esta nueva clasificación se muestra en el Tabla 8, resaltando con dos colores diferentes los tipos de problemas que se refieren a empaque regular e irregular, para hacer referencia a la clasificación propuesta inicialmente por Imahori & otros (2006) y Bennell & Oliveira (2006).

Tabla 8 | Clasificación de los problemas de corte y empaque

Problema de corte y empaque Clasificación					
Items idénticos «Identical Item»	Ubicación «Placement»	Mochila «Knapsack o Rucksack»	Dimensiones abiertas «Open dimension»	Corte de patrones «Cutting Stock»	Hoja, caja, contenedor «Bin Packing»
Objetivo: Maximización El gran objeto es limitado. No es posible ubicar todos los ítems			Objetivo: Minimización El gran objeto puede ser tan grande que permita ubicar todos los ítems. Las dimensiones de este deben ser minimizadas		
Clasificación de las piezas			Clasificación de las piezas		
Idénticos	Levemente heterogéneos	Heterogéneos	Arbitrario	Levemente heterogéneos	Heterogéneos
Descripción del tipo de problema			Descripción del tipo de problema		
Asignar el mayor número de ítems a un grupo dado de grandes objetos.	Los ítems deben ser ubicados en un grupo dado de grandes objetos (se busca minimizar desperdicio maximizando la cantidad de ítems)	Una serie de ítems debe ser ubicado en un grupo de grandes objetos. La disponibilidad de estos es limitada, no todos los ítems caben. Se debe maximizar la cantidad de ítems ubicados	Un grupo de ítems se debe ubicar en su totalidad en uno o varios grandes objetos. Los objetos son dados, pero su extensión en al menos una dimensión es variable. El valor de entrada (longitud, volumen) debe ser minimizado.	Los ítems deben ser completamente ubicados en una selección de grandes objetos de un tamaño mínimo. La extensión del objeto es fija en todas las dimensiones.	Los ítems deben ser ubicados en grandes objetos de igual tamaño. Puede ser para ítems levemente o heterogéneos. Se busca minimizar la cantidad y/o el área o volumen del gran objeto.

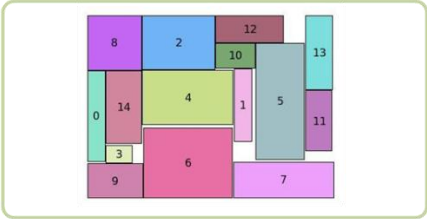



■ Problema de empaque irregular

Fuente: elaboración propia. Basado en: Wäscher y otros (2005)

Después de analizar las clasificaciones presentadas y relacionarlas con los objetivos específicos del presente proyecto, se restringe la búsqueda del estado del arte a las categorías de “*open dimension problem*” o problema de dimensiones variable, que se refiere al empaque de piezas irregulares (Bennell & Oliveira, 2006) y “*bin packing problem*” o empaque en cajas o contenedores, ya que a pesar de que el objetivo sean piezas irregulares, las soluciones que se encuentren para esta última categoría pueden ser aplicadas.

A la categoría de dimensión variable es a la que se llama problemas de anidamiento (Bennell & Oliveira, 2006). Estos se relacionan con problemas donde un número de piezas de geometría irregular debe ser ubicado en una banda rectangular y su longitud debe ser minimizada sin que las piezas de sobre-pongan (Jens, Benny K., & Allan, 2004), o donde más de una pieza de forma irregular debe ser ubicada en una configuración con otras piezas con el fin de optimizar un objetivo (Bennell & Oliveira, 2006) (Ver Tabla 9). Las formas irregulares están definidas como polígonos simples, y en algunos casos, aunque puede representar esfuerzos computacionales, los polígonos pueden tener agujeros (Bennell & Oliveira, 2006) (Ver Tabla 10).

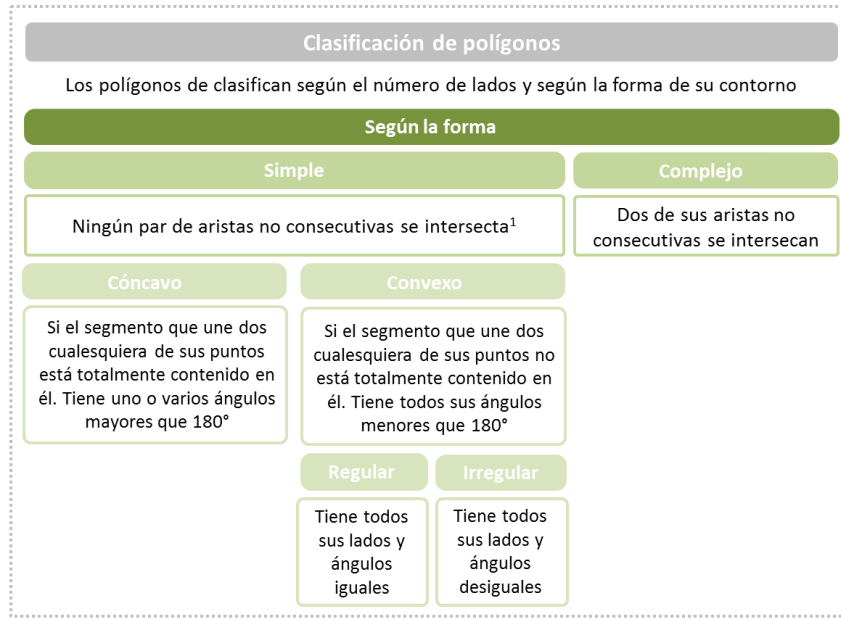
Tabla 9 | Ejemplos de problemas “bin packing” y “nesting”

Problemas “Bin packing” y «Nesting» Ejemplos	
«Bin packing»	«Nesting»
2D	2D
	
3D	3D
	

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes tomadas de internet²

² Ver 6. Fuentes

Tabla 10 | Clasificación de polígonos



¹ Dos lados que se intersectan en un vértice v, se llaman lados consecutivos

Fuente: Elaboración propia. Basado en: Rivero (2013)

La categoría de “bin packing” está relacionada con problemas en los que dados una serie de ítems rectangulares y un número finito de grandes objetos: hojas, cajas o contenedores; se busca ubicar los ítems sin que se sobre-pongan, en el mínimo número de grandes objetos, con sus ejes paralelos a este (Lodi & otros, 2002).

Los dos tipos de problemas seleccionados tienen una serie de aplicaciones en la industria, las cuales se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11 | Aplicaciones problemas “bin packing” y “nesting”

Aplicaciones Problemas «bin packing» y «nesting»			
Problemas de anidamiento «nesting»		Empaque en hojas, cajas o contenedores «bin packing»	
2 Dimensiones (plano)	3 Dimensiones (Espacio)	2 Dimensiones (plano)	3 Dimensiones (Espacio)
Corte de lámina metálica, material para zapatería, mobiliario y textiles (Benell & Oliveira, 2006)	Diseño de empaques, optimización de empaques primarios y secundarios. Prototipaje rápido, corte 3D (Osogami, T. 1998).	Industrias de Vidrio, madera, papel y textiles. Ubicación de cajas en estanterías. Diagramación de periódicos (Lodi & Otros, 2002).	Corte de espumas para mobiliario, carga de estibas y contenedores, diseño de empaques (Lodi & Otros, 2002).

Fuente: Elaboración propia. Basado en: Osogami (1998), Lodi & otros (2002), Benell & Oliveira (2006)

En la literatura se pueden encontrar algoritmos que proponen diferentes acercamientos para afrontar los retos presentes en los dos tipos de problemas descritos anteriormente, pero cabe anotar que es también necesario tener una adecuada representación geométrica y manipulación de las piezas (Bennell & Oliveira, 2006), siendo esta la primera etapa de la conceptualización del problema de corte y empaque, seguida por el “*sorting*” o ubicación de las piezas y por último por la optimización de los resultados obtenidos. Este proceso se representa gráficamente en la Figura 6.

Figura 6 | Proceso de solución de problemas de corte y empaque



Fuente: Elaboración propia

En la etapa de representación, las piezas pueden representarse mediante polígonos convexos y las curvas pueden aproximarse con una serie de líneas tangentes exteriores. Para evitar esfuerzos computacionales innecesarios pueden omitirse los agujeros interiores y simplificar las piezas eliminando concavidades pequeñas (Gomes & Oliveira, 2004).

Las siguientes etapas son las de clasificación, manipulación, ubicación y finalmente la de optimización. Para mostrar las soluciones para estas etapas en el problema de “*bin packing*”, se construyó la Tabla 12, en la cual se encuentra el nombre y la descripción de algunos de los algoritmos encontrados.

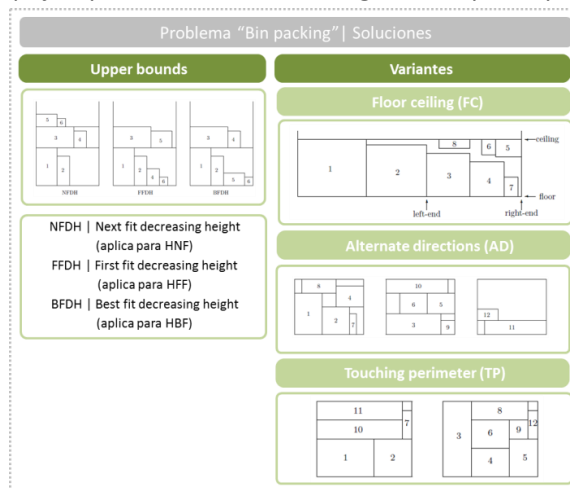
Para complementar las definiciones de la tabla anterior, se ilustran cómo serían los resultados para los algoritmos de dos fases (HFF -Hybrid first fit-, HNF -Hybrid next fit-, HBF -Hybrid best fit-), alternate directions (AD), floor ceiling (FC) y Touching perimeter (TP) en la Tabla 13.

Tabla 12 | Algoritmos para problema “bin packing”

Problema “Bin packing” Algoritmos existentes				
Upper bounds	Lower bounds	Heuristics	Metaheuristics	Variantes
Soluciones mayores que, o iguales a los elementos del conjunto (Mac Lane & Birkhoff, 1991)	Soluciones menores que, o iguales a los elementos del conjunto. Estos algoritmos computan el área mínima requerida para empacar cierto número de items (Mac Lane & Birkhoff, 1991).	Exact Algorithms Los items se organizan por área creciente. Se busca encontrar una solución reduciendo el tamaño del contenedor.	Se hacen suposiciones en el problema de optimización. Procedimientos mas abstractos que los heurísticos. No garantizan una solución global, pero dan buenas aproximaciones (Blum & Roli, 2003) .	2BP O G
1 Fase		Árbol de decisión (Rama externa): en cada punto de decisión, el item es asignado al contenedor sin especificar su posición actual. Usa Lower bounds.	Dada una solución existente, se realizan movimientos que la modifiquen y va migrando los items a un contenedor específico. Si este no tiene mas espacio un nuevo contenedor es creado.	2BP R G
Contenedores finitos		Árbol de decisión (Rama interna): Se determina un empaque viable para los elementos asignados a un contenedor. Puede ser a través de la enumeración de todas las posiciones posibles. La viabilidad se prueba usando algoritmos heurísticos (determinando las posiciones posibles mas abajo y a la izquierda donde los ejes estén en contacto con el contenedor o un objeto existente .	Tabu search	2BP O F
Finite first fit FFF: Basado en FFDH. El item es empacado en el primer nivel del primer contenedor, alineado a la izquierda, si no encaja otro nivel o contenedor son creados.		Algoritmos genéticos Proceso que imita la evolución natural. Cada posible solución tiene una serie de propiedades (cromosomas o genotipos) que pueden ser mutadas y alteradas hasta llegar al máximo número de generaciones o hasta que la población llegue a una condición satisfactoria (Mitchell, 1996).	Uso de las estructuras de memoria, para identificar las soluciones ya visitadas por el algoritmo o que estén fuera de las restricciones y las marca como “Tabú”, excluyéndolas (Glover, 1989)	Floor ceiling (FC): Empaca los objetos por niveles, cuando los ejes de estos tocan la parte inferior (piso) o superior (techo) del contenedor. Los items del piso se empacan de izquierda a derecha y los del techo de derecha a izquierda.
2 Fases				Alternate directions (AD)
Contenedores con una de sus dimensiones infinita				2BP R F
Hybrid first fit (HFF): Se resuelve a través de FFDH (Empaca cada nivel en el contenedor con el menor inicio; si no se ajusta, inicializa un nuevo contenedor				Floor ceiling (FC)
Hybrid next fit (HNF): Ejecuta el algoritmo FFDH(empaca el siguiente item justificado a la izquierda en el primer nivel donde encaje, si lo hay. Si no lo hay, crea un nuevo nivel)				Touching perimeter (TP): Organiza los items por área decreciente y horizontalmente. Empaca un item al tiempo, si este no se ajusta al contenedor existente, crea uno. El primer item se empaca en la parte inferior, alineado a la izquierda. Los items siguientes se empacan dependiendo del porcentaje de perímetro en contacto con el contenedor u objetos ya ubicados.
Hybrid best fit (HBF): Usa la estrategia BFDH (el item se empaca alineado a la izquierda en el nivel correspondiente; si no se ajusta, se crea uno nuevo). Posteriormente, se empaca el nivel creado en un contenedor existente, si se ajusta o nuevo				
No levels (1Fase)				
Botton left (BL) y Finite botton left (FBL): Organiza los items por ancho decreciente y lo empaca en la posición mas baja. Justificado a la izquierda. Si no se ajusta, se crea un nuevo contenedor				
Alternate directions (AD): Empaca en la parte inferior un subconjunto de items, siguiendo BFDH. Los items siguientes se empacan en la parte superior de los items ya ubicados, de izquierda a derecha o de derecha a izquierda. Cuando no puedan empacarse mas items, se inicializa un nuevo contenedor.				

Fuente: Elaboración propia. Basado en: Lodi, Martello & Vigo (2002) y Lodi, Martello & Monaci (2001). Las citas de autores diferentes a estos, se especifican en el gráfico.

Tabla 13 | Ejemplo de resultados de algoritmos por capas, AD y FC



Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Lodi & otros (2002)

En los algoritmos presentados de “bin packing”, aparece una categoría denominada variantes propuesta por Lodi & otros (2002). Esta surge porque algunos de los algoritmos existentes (Lodi & otros, 2002; Imahori & otros, 2006) no tienen restricciones como el corte tipo guillotina, es decir, cortes eje a eje paralelos al eje de la hoja, ni la posibilidad de rotar los objetos (Lodi & otros, 2002). La rotación (usualmente 90°), es considerada con el fin de lograr mejores empaques y en algunos de los algoritmos encontrados se asume que los objetos tienen una orientación fija.

Finalmente, la caracterización de las variantes se deriva de estas dos restricciones (orientación y rotación), las cuales se explican a continuación. En Lodi & otros (2002) se citan algunos artículos que realizan aplicaciones para cada una de estos tipos de problemas.

- 2BP | O | G | Piezas orientadas, corte guillotina³
- 2BP | R | G | Permite rotación en las piezas, corte guillotina⁴
- 2BP | O | F | Piezas orientadas, corte libre
- 2BP | R | F | Permite rotación en las piezas, corte libre

Para el problema de anidamiento, se encontraron dos métodos de solución del problema propuestos por Nielsen & Odgaard (2003), métodos de ubicación restringida (“*legal placement methods*”) y métodos de ubicación libre (“*Relaxed placement methods*”). Sus definiciones se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14 | Métodos de solución de problemas de anidamiento

Problema “nesting” Métodos	
Legal placement	Relaxed placement
<p>Este método nunca viola la restricción de que las piezas no pueden superponerse. Cada ítem se ubica en un espacio vacío del contenedor.</p> <p>Los siguientes son los pasos que frecuentemente se siguen en este tipo de soluciones: (1) Clasificar los ítems. Puede ser por homogeneidad o por alguna dimensión (2) Ubicar los ítems utilizando alguno de los algoritmos de 2 fases de “bin packing”(3)Evaluar la solución o cambiar la posición de los ítems.</p>	<p>Permite que las piezas se superpongan como parte del proceso de búsqueda de soluciones. El objetivo es entonces minimizar la cantidad de piezas superpuestas. Cuando la cantidad de piezas superpuestas llega a cero, el problema se vuelve de “legal placement”.</p> <p>(1) Inicialmente, se ubican las piezas, puede hacerse aleatoriamente, aunque se recomienda empezar con una mejor ubicación que esa (2) Se busca minimizar las piezas superpuestas cambiando iterativamente los ítems, trasladándolos (horizontal o verticalmente) o rotándolos.</p>

Fuente: Elaboración propia. Tomado de: Nielsen & Odgaard (2003)

Además de la anterior, Xie, Wang & Liu (2007) proponen una clasificación dependiendo del tipo de algoritmo utilizado (ver Tabla 15). Estos pueden clasificarse dentro de “legal” o “relaxed placement”, dependiendo de la metodología utilizada.

³ Debido a que el problema a solucionar en el presente proyecto no es de corte, se omiten en el estado del arte los algoritmos encontrados para corte tipo guillotina.

⁴ Ibídem

Tabla 15 | Algoritmos para problemas de anidamiento

Problema "nesting" Algoritmos existentes					
Enclousure	Bottom left	Space searching	Heuristics	Meta heuristics	Hybrid algorithms
El procedimiento consiste en encerrar los items en una figura, ya sea rectangular o hexagonal que los contenga, ubicar las piezas y reanudar las partes a su geometría original	Se ubican los items por columnas. Cuando la primera columna alineada a la izquierda, se llena, se crea una nueva. Si hay varios items con anchos iguales, el algoritmo las prioriza	Consiste en encontrar los espacios vacios del contenedor. Cuando estos se hallan se aplica alguno de los algoritmos existentes para ubicar items (ubicación secuencial de items, procesos de ubicación según dimensiones)	<p>Genera diferentes patrones de ubicación guiados por métodos heurísticos o aleatorios para así encontrar el óptimo</p> <p>Algoritmos genéticos</p> <p>Proceso que imita la evolución natural. Cada posible solución tiene una serie de propiedades (cromosomas o genotipos) que pueden ser mutadas y alteradas hasta llegar al máximo número de generaciones o hasta que la población llegue a una condición satisfactoria (Mitchell, 1996)</p>	<p>Se hacen suposiciones en el problema de optimización. Procedimientos mas abstractos que los heurísticos. No garantizan una solución global, pero dan buenas aproximaciones (Blum & Roli, 2003) .</p> <p>Tabu search</p> <p>Uso de las estructuras de memoria, para identificar las soluciones ya visitadas por el algoritmo o que estén fuera de las restricciones y las marca como "Tabú", excluyéndolas (Glover, 1989)</p>	Combina las ventajas de los diferentes algoritmos para solucionar problemas «nesting», ya sean Heurísticos, Meta-Heurísticos, entre otros.
Rectangulares					
Hexagonales					

Fuente: Elaboración propia. Basado en: Xie, Wang & Liu (2007) Las citas de autores diferentes a estos, se especifican en el gráfico.

Tabla 16 | Aproximaciones geométricas para problemas de anidamiento

Problema "nesting" Algoritmos existentes			
Acercamientos geométricos			
Uno de los obstáculos en los problemas de anidamiento es la geometría, pero no solo por la representación de las piezas, sino también por la necesidad de identificar si las piezas están o no en contacto y si se están sobreponiendo			
Pixel raster method	Direct trigonometry	Non Fit polygon (NFP)	Phi function
Aproximaciones que dividen el contenedor en áreas discretas para reducir la información geométrica y codificar los datos en una malla representada en una matriz.	Se representan las piezas como poligonos. Las piezas se sobreponen si los «bounding boxes» se interceptan, dependiendo del resultado se valida si hay contacto entre los ejes de los poligonos.	El NFP es el resultado de deslizar un polígono A alrededor de B. No hay rotación, solo traslación. A y B siempre se tocan pero no se sobreponen	Está asociado con NFP. Es una expresión matemática que representa la posición entre dos items. Si el valor de la función es > 0 los items están separados, si es $= 0$ se tocan las fronteras y si es < 0 se sobreponen.
	D-function: Función que indica la posición de un punto P con respecto a un eje orientado AB.	Inner fit polygon: El NFP identifica la frontera exterior de los poligonos. IFP permite identificar fronteras internas en piezas con agujeros.	

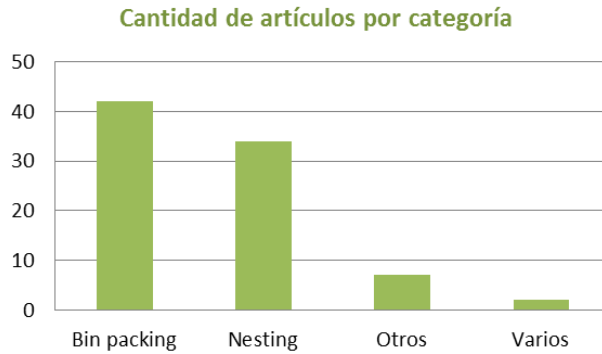
Fuente: Elaboración propia. Basado en: Bennell & Oliveira (2006)

Finalmente, las soluciones de las clasificaciones anteriores, se complementan con los acercamientos geométricos citados por Bennell & Oliveira (2006) y Egeblad, Nielsen & Odgaard

(2006) (Ver Tabla 16). Estos son algoritmos para la solución del problema de representación de las piezas y para identificar si se superponen o si están o no en contacto.

Teniendo en cuenta las clasificaciones encontradas por los diferentes autores citados, se clasificaron los artículos de la base de datos construida. Primero identificando cuáles trataban el problema de “bin packing”, cuáles el de anidación y cuáles de otra clase (Ver Figura 7).

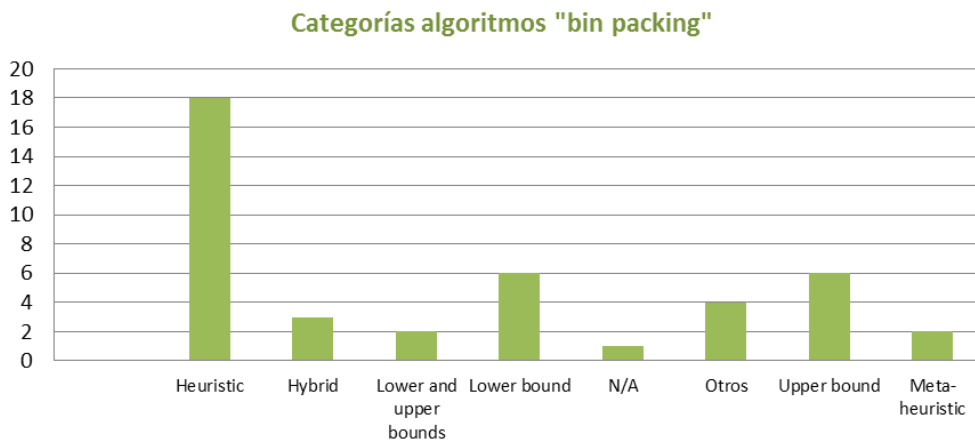
Figura 7 | Cantidad de artículos por categoría



Fuente: Elaboración propia

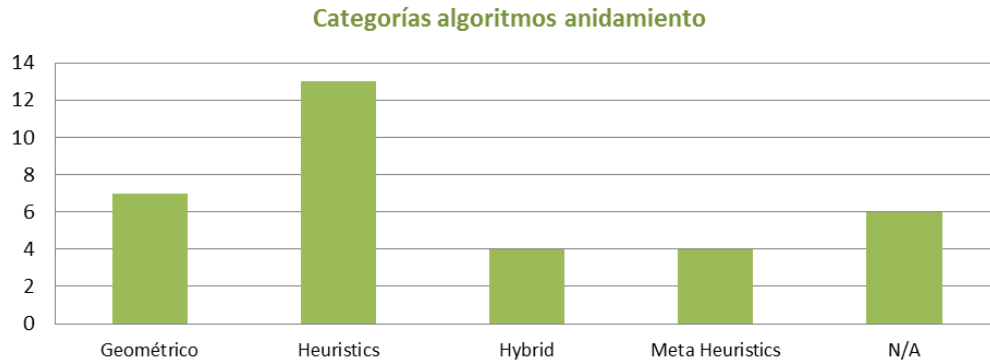
Posteriormente, se catalogaron según el tipo de solución los artículos encontrados para los dos tipos de problemas con el fin de identificar los algoritmos con más presencia en las publicaciones científicas. En la Figura 8 para el problema “bin packing” y en el Figura 9 para problemas de anidamiento.

Figura 8 | Cantidad de algoritmos por categoría (problema “bin packing”)



Fuente: Elaboración propia

Figura 9 | Cantidad de algoritmos por categoría (problemas de anidamiento)



Fuente: Elaboración propia

En las gráficas puede evidenciarse que la mayoría de resultados proponen soluciones por métodos heurísticos. La cantidad de artículos con soluciones heurísticas y meta heurísticas se debe a la dificultad en la solución del problema y en la búsqueda de algoritmos más rápidos y simples computacionalmente.

Finalmente, en la Tabla 17, se encuentra la línea de tiempo para cada uno de los tipos de algoritmos encontrados para la solución de los problemas de “bin packing” y “nesting” respectivamente.

Tabla 17 | Línea de tiempo para algoritmos de “bin packing” y “nesting”



Fuente: Elaboración propia

La búsqueda de información para el estado del arte tecnológico, se enfocó en identificar qué software de optimización de empaques existen disponibles en el mercado. Los hallazgos se encuentran a continuación.

Para el caso de optimización de empaques en dos dimensiones (2D) no se encontraron software disponibles, pero sí para el problema de corte de tela y lámina metálica. En la Tabla 18 se encuentran las empresas que lo ofrecen, el nombre del software y una pequeña descripción la aplicación.

Tabla 18 | Software de optimización de telas y lámina metálica

Software de optimización de telas y lámina metálica		
Software	Imagen	Descripción
 Meta CAM Leading the Industry with Innovation CAD/CAM Solutions		Tiene algoritmos para el corte de línea común. Para aplicaciones de: Punzonado, corte láser. http://www.solidservicios.com/productos/metacam/anidado/
 Sigmanest		Aplicaciones: Plasma, Oxi-acetileno, Punzonadora, ruteadora, corte con chorro de agua http://www.sigmanest.com/en-us/index.aspx
 MyNesting		Free trial, Exporta DXF http://www.mynesting.com Video: http://www.mynesting.com/flash/mynestingstandalone_overview_800600.html
 ProNest		Aplicaciones: Plasma, Oxi-acetileno, Punzonadora, corte con chorro de agua http://www.hyperthermcam.com/products/pronest.php
 NestLib		Free trial, Exporta DXF https://www.nestibonline.com/

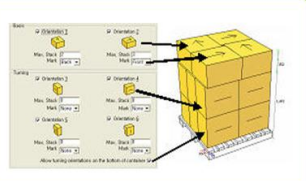
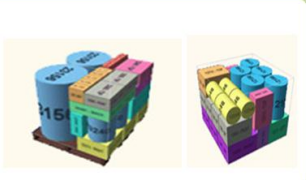

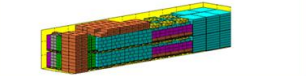
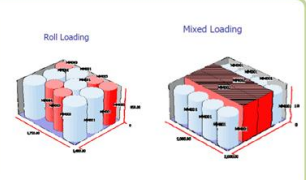
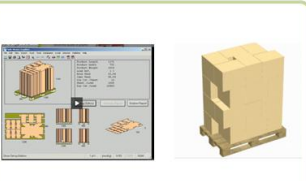
Fuente: Elaboración propia. Imágenes tomadas de internet⁵.

En el caso de tres dimensiones (3D) se encontraron software de optimización de estibas y contenedores donde se optimiza el espacio que ocupan cajas o cilindros. En el caso de empaque

⁵ Ver 6. Fuentes

de productos en cajas, se encontraron software que permiten optimizar empaques que contienen piezas con la misma forma, por ejemplo cajas, latas o botellas. Algunos permiten piezas combinadas, por ejemplo cilindros y cubos en el mismo empaque, pero no se encontraron software de piezas irregulares o diferentes en forma y tamaño entre ellas. La información encontrada se encuentra en la Tabla 19.

Tabla 19 | Software comerciales optimización 3D

Software comerciales de optimización 3D		
Software	Imagen	Descripción
Logensolutions		Carga eficiente de camiones, contenedores y estibas. http://www.logensolutions.com/VMS/CubeMaster/Cargo_Load_Plan_Optimization_Software_Overview.html
Load Planner		Planeación de la carga y soluciones óptimas. Algoritmo 3D. http://www.loadplanner.com/
CAPE Systems		Software para resolver problemas de paletización. http://www.capesystems.com/index.htm
		Software para planear, crear y editar planes de carga múltiple en contenedores y camiones.
INTELOAD Intelligent Load Planner		Optimiza la distribución de la carga, basado en el contenedor, camión o estiba. http://www.fujitsu.com/downloads/TH/inteload.pdf
Artios CAD		Ubicación de empaques en las estibas. http://www.esko.com/en/Products/overview/artioscad/movies

Fuente: Elaboración propia. Imágenes tomadas de internet⁶.

Además de lo anterior, para la búsqueda de información para el estado del arte tecnológico, también se hizo una búsqueda de patentes o registros. Esta se hizo en las bases de datos: WIPO,

⁶ Ver 6. Fuentes

Esp@cenet, USTPO, Copyright.org y Google Patents, con las palabras clave y ecuaciones de búsqueda que se encuentran en Tabla 20.

Tabla 20 | Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para patentes y/ registros

Palabras clave	Ecuaciones de búsqueda
Nesting + Software	TTL/((nesting)AND(software)) (nesting)[in Keyword Anywhere (GKEY)] AND (software)[in Keyword Anywhere (GKEY)]
Packaging + Software	TTL/(packaging AND software) (packag)[in Keyword Anywhere (GKEY)] OR ("software")[in Keyword Anywhere (GKEY)]
Optimisation + Software	(optimisation)[in Title (TKEY)] AND ("software")[in Title (TKEY)]
Packaging	(packaging)[in Title (TKEY)]

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, ya que sólo se registraron en la base de datos 8 patentes, las cuales se documentaron en una base de datos como se muestra en el Figura 10. Esta base de datos se intentó completar utilizando búsquedas a través de la clasificación USPC (United states patent classification) con los números 717 (Data processing: software development, installation and management) y 712 (Electrical computers and digital data processing systems: processing architectures and instruction processing) y filtrando con las palabras clave “packaging”, “nesting” y “optimization”, pero tampoco hubo resultados relacionados con el tema. Ver Anexo 2.

Figura 10 | Base de datos patentes software de optimización de empaques

#	Nombre de la patente	Inventores	Patrocinador	Clasificación internacional	Año (Publicación)	Abstract	Link
1	System for executing nested software loops with tracking of loop nesting level	Geoddy; Rebecca (Hemel, GB); McGovern; Brian Pavlos (Cambridge, GB); Verväinien; Matti Juhani (Tampere, FI)	Nokia Mobile Phones Limited (Espoo, FI)	Current U.S. Class: 712/241; 712/69 017; 712/69 065; 712/69 078 Current International Class: G06F 9/30 (20060101); G06F 9/32 (20060101); G06F 9/38 (20060101); G06F 9/39 (20060101) Current CPC Class: G06F 9/3001 (20130101); G06F 9/325 (20130101); G06F 9/38 (20130101)	1998	Method and apparatus for executing nested software loops with tracking of loop nesting level. The processing circuit includes a program counter and a plurality of loop counting elements. Each of the loop counting elements includes a first address register and address register; a loop detection register; and a compare register. A system (10) includes a port input device (12) a program logic controller (14) with an address decoder (16) and a control unit (18). The system includes a nesting table of nesting objects together with means for updating entries in the nesting table for adding layout for a unit of program code to the nesting table on a first time the nesting object is added to the table.	https://www.google.com/patents/US6383074
2	Method and systems for nesting objects	Isaac Sedovnik	Nestech Inc.	DP 1053084 A2 (nest from WO/0199023/97A1)	2000	A system (10) includes a port input device (12) a program logic controller (14) with an address decoder (16) and a control unit (18). The system includes a nesting table of nesting objects together with means for updating entries in the nesting table for adding layout for a unit of program code to the nesting table on a first time the nesting object is added to the table.	http://www.google.com/patents/EP1233264
3	Method, apparatus, and computer program for reducing plate material waste in flexography plate making	Hans Dewite, Thomas Klein	Esko-Graphics	EP1292120 B1 HO4N1/087 HO4N1/087C	2007	The invention relates to printing and in particular to reducing plate material waste in flexography plate making.	https://www.google.com/patents/EP1292120B1

Fuente: Elaboración propia

2.2. Diseño para empaque

Para el segundo tema identificado, lineamientos o metodologías existentes de diseño de empaques, se construyó un “corpus” con artículos encontrados utilizando las ecuaciones de búsqueda que se encuentran en la Tabla 21. Algunas de estas se tomaron de las reportadas por Azzi, A & otros (2012). La base de datos elegida para la búsqueda fue SCOPUS.

Tabla 21 | Palabras clave y ecuaciones de búsqueda para diseño para el empaque

Palabras clave	Ecuaciones de búsqueda
Quality + design + packag*	TITLE((quality) AND (by) AND (design) AND (packag*))
Design + packag* + framework	TITLE((design) AND (packag*) AND (framework))
Packag* + development + framework	TITLE((packag*) AND (development) AND (framework))
Packag* + development + guidelines	TITLE((packag*) AND (development) AND (guidelines))
Design for packag*	TITLE((design) AND (for) AND (packag*)) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA, "ENGI")) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA, "BUSI"))
Design + packag* + procedure	TITLE((design) AND (packag*) AND (procedure
Design + packag* + guidelines	TITLE((design) AND (packag*) AND (guidelines)) TITLE((design) AND (packag*) AND (guide*)))

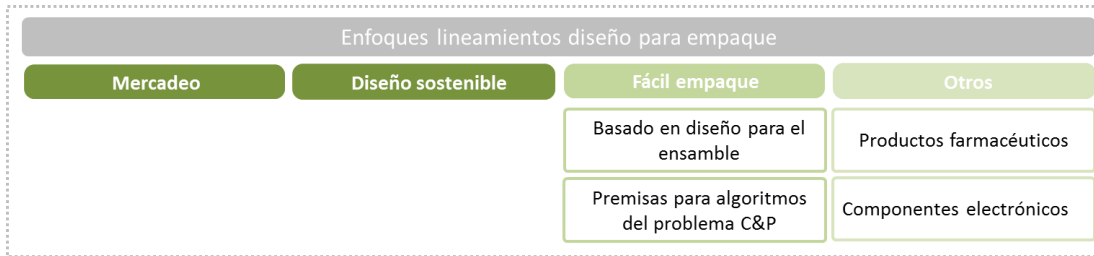
packag=packaging, package*

Fuente: Elaboración propia

En total se encontraron 115 artículos, de los cuáles fueron elegidos para documentar en el “corpus”, 41. Esta selección se hizo con base en la información contenida en los títulos y los abstract, además se hizo una clasificación de los artículos (ver Tabla 22) -basada también en lo anterior-, de los enfoques de los lineamientos para el diseño para el empaque identificados: logística, mercadeo, diseño sostenible y diseño para el fácil empaque. Este último se divide en los que están basados en las premisas de diseño para el ensamble y para el medio ambiente y en los que se basan en los requerimientos para los algoritmos que resuelven el problema de corte y empaque.

Se creó además una categoría llamada “otros” que agrupa los artículos de diseño de maquinaria para empaques (Ningbin, 2012) y empaques para componentes electrónicos y productos farmacéuticos, los cuales tienen un enfoque diferente al que se busca en el presente proyecto por estar basados en los materiales, garantía de la hermeticidad, entre otros (Nadpara, Thumar, & Kalola, 2012; Hopkins, 1998; Pecht, Barker, & Dasgupta, 1993; Gerber & Dreiza, 1996; Chen, Lai, Wang, & Hsiao, 2006; Foster, Dulikravich, Martin, & Halderman, 1994; Lee, Montero, & Wright, 2003) .

Tabla 22 | Enfoques lineamientos diseño para empaque



Fuente: Elaboración propia

El “corpus” tiene los campos mostrados en Figura 11. La elaboración de esta permitió realizar análisis como; cantidad de artículos encontrados para cada enfoque y el interés en el tema de lineamientos para empaques a través del tiempo. En la Figura 12 se puede observar que la tendencia en cantidad de publicaciones y el interés en el tema es creciente, además que la mayoría de publicaciones están enfocadas al diseño sostenible, al papel del empaque como herramienta en la decisión de compra y mercadeo en general, pero la gran mayoría están en la categoría “otros” donde se agrupan publicaciones del campo farmaceutico y electrónico; empaques con exigentes requerimientos de diseño. Ver Anexo 3.

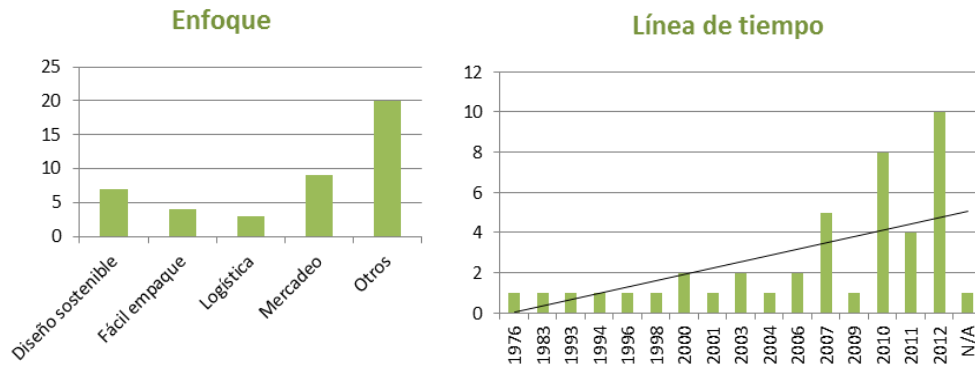
Figura 11 | “Corpus” artículos de diseño para el empaque

#	Ecuación de búsqueda	Link	Enfoque	Nombre del artículo	Revista/congreso	Autor	Año	Abstract
1	((packag*) WN AI	http://www	Mercadeo	On the logistics effects of Integrated Product and Package Design	Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design	Bramblev, Caroline ¹ ; Hansen, Claus Thorp ²	2007	If engineering designers consciously design product and package in an integrated manner,
2	((packag*) WN AI	http://www	Otros	Design methodology for the thermal packaging of hybrid electronic-mechanical products: A Case Study on the Berkeley Emulation Engine (BEE)	Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference	Lee, Roderick K.W. ¹ ; Montero, Michael G. ¹ ; Wright, Paul K. ¹	2003	This paper presents a design methodology for the thermal design and packaging of hybrid
3	((packag*) WN AI	http://www	Mercadeo	Innovation packaging design of Anji dried bamboo shoots	2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design	Zhang, Zhiguo ¹ ; Song, Riheng ¹ ; Xu, Xiaolin ¹	2010	Innovation design is the core strategy in the business competition, and the main purpose of which is to incentive the special
4	((packag*) WN AI	http://www	Mercadeo	Analysis of multi-cultural influences of modern packaging design	17th IAPRI World Conference on Packaging	Chao, Zhao ¹	2010	Packaging design is rich in cultural implication, the human mind is full of positive creative results. In the

Fuente. Elaboración propia

Después de este análisis y con base en la lectura de los artículos que se consideraron relevantes, se concluye que en la literatura existen lineamientos para el diseño de empaques, y que el interés en el tema está incrementando, pero la mayoría enfocados al mercadeo (Mininni, 2012; Labbe & Martin, 2011; Simms & Trott, 2010) y al diseño sostenible (Haiyan-Huang, 2012; Jie, 2011; Chen, Zhang, & Sun, 2011; Tao & Zhong, 2012; Grönman, y otros, 2012). A pesar de esto, existe información relacionada con directrices para el empaque de piezas en los artículos encontrados para el problema de corte y empaque, las cuales son creadas por los autores para restringir la programación.

Figura 12 | Enfoque y línea de tiempo de artículos relacionados con diseño para el empaque



Fuente: elaboración propia

Estas restricciones se crearon para generar las soluciones iniciales de los algoritmos, y consisten en clasificar las piezas por criterios como, ancho, largo (Oliveira & Gomez, 2001; Oliveira, Gomes, & Ferreira, 2000) o área decreciente (Oliveira & Gomez, 2001; Oliveira, Gomes, & Ferreira, 2000). De esta manera, las piezas son organizadas por su área, y la pieza de mayor área es la que se ubicará en primer lugar y así, hasta ubicar la pieza de menor área (Wen-Chen Leea, 2007).

También se utilizan criterios como irregularidad decreciente, rectangularidad decreciente o una clasificación aleatoria (Oliveira & Gomez, 2001; Oliveira, Gomes, & Ferreira, 2000). La irregularidad es medida cómo la diferencia entre la pieza y su respectivo “convex hull⁷” y la rectangularidad es medida cómo la diferencia entre el área de la pieza y el rectángulo que la encierra (Oliveira & Gomez, 2001).

Estos lineamientos, como se mencionó anteriormente, tienen una justificación basada en restricciones de la programación como tal, pero autores como Lee & Lye (2003) proponen una metodología que aunque no esté enfocada en el desarrollo de un algoritmo en particular, proporciona unos lineamientos de diseño para el fácil empaque.

Esta metodología es llamada “diseño para el empaque manual” (DFPkg) y además de proponer lineamientos basados en el diseño para el medio ambiente (DFEnv) y el diseño para el ensamble (DFA), calcula un índice donde la efectividad de diferentes operaciones de ensamble puede ser comparada. Cabe anotar que se concibe como empaque manual el tipo de empaque que

⁷ Convex hull (Envolvente convexa). Sea S un conjunto finito, de puntos del plano. El menor conjunto convexo que contiene a S. Dicho conjunto siempre existe y se llama envolvente convexa (Rivero, 2013).

Sea $S = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ un conjunto de puntos $p_i \in E^3$. El “convex hull” de S, $H(S) \in E^3$ es el “convex set” mínimo tal que $S \subseteq H(S)$. Convex set. Un conjunto C contenido en un universo U es convexo si: $\forall p, q \in C, \overline{pq} \subseteq C$; donde \overline{pq} representa el segmento con los elementos finales p y q, definidos por $\overline{pq} = \{\lambda p + (1 - \lambda) \cdot q \mid \lambda \in [0,1]\}$, con los operadores de adición y multiplicación definidos en el universo U. Si $U = E^3$, con adición y multiplicación real, el segmento tiene su significado usual de un subconjunto de una línea recta (Ruiz, s.f).

comprende las operaciones de doblar, insertar, envolver, sellar y etiquetar, realizadas por el hombre (Lee & Lye, 2003).

Los lineamientos basados en el DFA tienen en cuenta aspectos como la simetría del empaque y piezas a empacar, minimizar la posibilidad de cometer errores, hacer la menor cantidad posible de movimientos para orientar las piezas y evitar que las piezas se enreden, atasquen o rompan el empaque (Lee & Lye, 2003); pero además de las anteriores, existen otras premisas de DFA propuestas por autores como (Boothroyd, Dewhurst, & Winston, 2002; Pahl, Beitz, Schulz, & Jarecki, 2007; Andreassen, Myrup, & Kähler, 1983) que podrían también aplicar y completar las premisas para el diseño para el empaque propuestas por Lee & Lye (2003).

3. Capítulo 3 | Desarrollo del algoritmo de optimización para empaques

3.1. Directrices diseño para el ensamble

Teniendo en cuenta los hallazgos del estado del arte, existen diversos acercamientos para el problema de optimización de corte y empaque y existen también lineamientos para el diseño de empaques, pero no se ha formalizado una relación justificada entre los dos aspectos diferente a disminuir el esfuerzo computacional o facilitar el desarrollo de algoritmos.

Para optimización y diseño de empaques las soluciones encontradas son para casos puntuales y no se tiene en cuenta el ciclo de vida, a pesar de que se resalta el concepto de logística de empaque, donde se demuestra que este afecta una cadena: desde que se empaquen los productos hasta que estos llegan al consumidor final.

Una relación entre los conceptos mencionados, optimización y lineamientos de diseño de empaques; es tomar los lineamientos como restricciones de entrada para los algoritmos de optimización. De esta manera es posible lograr aplicar los resultados generados por estos, en la industria, y que tengan impacto en diferentes etapas del ciclo de vida del empaque.

Los lineamientos de diseño para el empaque manual propuestos por Lee & Lye (2003) mencionados en el estado del arte, se proponen como restricciones del algoritmo de optimización, sin embargo, estos son susceptibles de mejora ya que se encontró que aún existen otros lineamientos por identificar basados en el diseño para el ensamble (DFA) que guíen el diseño para el fácil empaque y desempaque.

Tabla 23 | Clasificación de lineamientos de diseño para el ensamble

Clasificación diseño para el ensamble (DFA)		
Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Anthony Knight	Pahl, G., Beitz, W., Schulz, H.-J., Jarecki, U.	Andreassen, M. Myrup, S. Kähler, T. Lund
Manejo de las partes	Operaciones de ensamble	Almacenamiento
Inserción de las piezas	Interfaces	Transporte
Sujeción de las piezas	Almacenamiento y manipulación	Posicionamiento

Fuente: elaboración propia

Los lineamientos de diseño para el ensamble buscan guiar el proceso de diseño para facilitar, optimizar y garantizar la confiabilidad del ensamble y surgen para facilitar la racionalización de los procesos de ensamble, lo cual comprende mejoras en la efectividad de este, en la calidad del producto y en el contexto mismo del sistema de ensamble (Andreassen, 1983). Estos lineamientos están clasificados de acuerdo a tres factores diferentes según la bibliografía consultada, como puede verse en la Tabla 23.

Basado en la tabla anterior se generó una única clasificación para listar los lineamientos de diseño para el ensamble publicadas por los tres grupos de autores citados anteriormente, buscando unificar las categorías encontradas y así facilitar el proceso de análisis para crear analogías para el diseño de empaques. Las categorías elegidas fueron manipulación, posicionamiento (Alinear, insertar) y sujeción.

La información encontrada en las publicaciones de los tres grupos de autores consultados, se clasificó y se consolidó en una tabla (ver Anexo 4), la cual es la síntesis de los lineamientos de DFA, su interpretación por parte de Lee & Lye (2003) y en el caso que no existiera, se creó una nueva interpretación que permita que estos lineamientos sean aplicados en el diseño para el empaque. Además, para cada lineamiento se tiene una columna con un ejemplo de un empaque existente que evidencie cada analogía. (Las directrices de un mismo autor que le apuntaran a un único lineamiento para diseño de empaques fueron agrupados y están separados por viñetas). En la Figura 13 se encuentran los campos de la tabla, que se encuentra completa en el Anexo 4.

Figura 13 | Analogías directrices diseño para el ensamble

Clasificación	Imagen directriz DFA	Directrices DFA	Analogía para diseño de empaques	Ejemplo en empaque existente
Manipulación	<p>Fuente: Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Anthony Knight</p>	<p>Fuente: Pahl, G., Beitz, W., Schulz, H.-J., Järcsök, U.</p> <p>Evitar elementos de igual interfaz que puedan bloquearse</p>	<p>Fuente: Andreassen, M., Myrup, S., Hansen, T., Lund, P.</p> <p>Evitar componentes de baja calidad</p>	<p>Fuente: Elaboración propia o Lee & Lye donde se especifica</p>
	<p>-Proporcionar espacios generosos, si no se hace evitar que las piezas se ataquen o inclinen durante la inserción. Eliminar características que permitan que las piezas se enreden.</p> <p>-Proporcionar características que eviten el atascamiento o anidamiento cuando se almacenan en masa</p>	<p>Evitar que las piezas se enreden o aniden.</p> <p>Hacer el transporte adecuado para los elementos</p>	<p>Evitar que las piezas se enreden o aniden.</p> <p>Usar componentes en forma de banda</p>	<p>-Las piezas a empacar deben ser posicionadas inicialmente de tal forma que se garantice que no habrá atascamiento.</p> <p>-Las piezas a empacar deben ser posicionadas inicialmente de tal forma que se garantice que no se enredarán.</p> <p>Los materiales utilizados para proteger las piezas deberán ser de una sola pieza por empaque (láminas) y no relleno suelto</p>

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Tabla 24, se concluye a partir del análisis anterior cuáles deben ser las premisas para el diseño de un algoritmo de optimización de empaques, basado en las analogías de los lineamientos de diseño para el ensamble, para así, como se mencionó anteriormente, guiar los resultados del algoritmo a aplicaciones reales.

Tabla 24 | Premisas de diseño para empaques y restricciones para el algoritmo

Restricciones para el algoritmo basadas en diseño para empaques	
Premisas	Restricciones
El contenedor en el que se van a empacar las piezas será simétrico (ejm. Cuadrado o rectangular)	Se predeterminará un contenedor que posteriormente se optimizará
Las piezas serán empacadas por capas	Se debe optimizar cada capa de piezas que se ingrese al algoritmo
Se asumirá que las piezas son convexas para evitar que se enreden y/o atasquen	Se trabajará con los “convex hull” de las piezas.
El contenedor será de un material no resbaladizo y rígido, su forma permanece sin tener que sostenerlo	
Las piezas serán posicionadas según el centro de gravedad y su geometría para evitar tener que sostenerlas mientras se empacan las demás	Las piezas se deben ubicar en su posición estable en el software CAD antes de ser ingresadas al algoritmo, teniendo en cuenta el centro de gravedad y la geometría
Las operaciones de rotación alrededor del eje horizontal de la pieza no se efectuarán ya que se dispondrán según el lineamiento anterior	Los movimientos de las piezas serán translación en los tres ejes (x, y, z) del contenedor y rotación solo alrededor del eje z del contenedor
El empaque se hará por la parte superior del contenedor	La dirección de empaque es el eje z del contenedor
En la primera capa se ubicarán las piezas de mayor peso, posteriormente se ingresarán las siguientes	El algoritmo determina qué piezas deben ir en la primera capa calculando la masa a partir del volumen y la densidad, por ejemplo

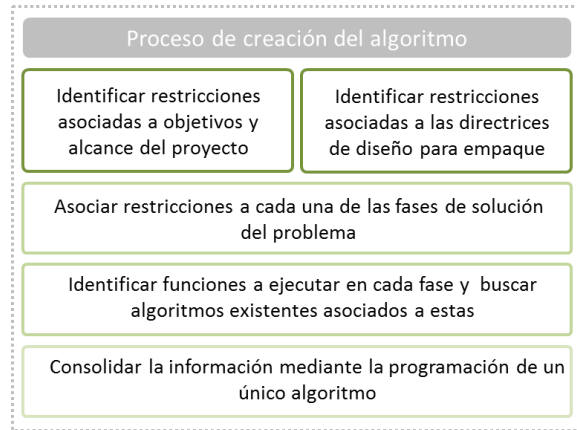
Fuente: Elaboración propia

3.2. Algoritmo de optimización de empaques

El proceso de desarrollo del algoritmo, desde la fase inicial, estuvo guiado por las restricciones de diseño para empaques y por las tres fases del proceso identificado en el análisis del estado del arte para la solución de problemas de corte y empaque: representación, clasificación y optimización (ver Tabla 26).

En la tabla que se encuentra a continuación, se muestra el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo del algoritmo:

Tabla 25 | Proceso de creación del algoritmo de optimización de empaques



Fuente: Elaboración propia

Las restricciones que fueron tenidas en cuenta para la programación, se derivaron del alcance y objetivos del proyecto, además, de las directrices de diseño para el empaque como fue mencionado anteriormente. En la Tabla 26 se encuentra el listado de estas, asociado a cada una de las fases y funciones que deben ejecutarse para la solución del problema.

Para la fase de representación se eligieron algoritmos desarrollados por Duque (2012), para leer archivos VRML (“Virtual Reality Modeling Language”) con la información geométrica de las piezas. Las funciones de translación, rotación y centro de gravedad, se programaron haciendo uso de matrices de transformación, cuaternión (Ruiz; Duque, 2012) y cuadratura de Gauss Radau, respectivamente, por facilidad de implementación y velocidad computacional. Para hallar el “convex hull” de las piezas se usó la función existente en Matlab. Finalmente, para identificar si el centro geométrico se encuentra en la proyección de la base, lo cual determina la estabilidad de la pieza, se usó una función propuesta por Khaled (2009), donde mediante determinantes se comprueba si un punto está contenido en un área.

Para la búsqueda de algoritmos que dieran soluciones a las fases de clasificación, ubicación, manipulación y optimización, se tuvieron en cuenta los análisis del estado del arte, que determinan cuáles algoritmos han sido utilizados en los últimos años, la cantidad de información disponible sobre estos y la velocidad de implementación.

Tabla 26 | Fases, funciones y restricciones para el algoritmo de optimización de empaques

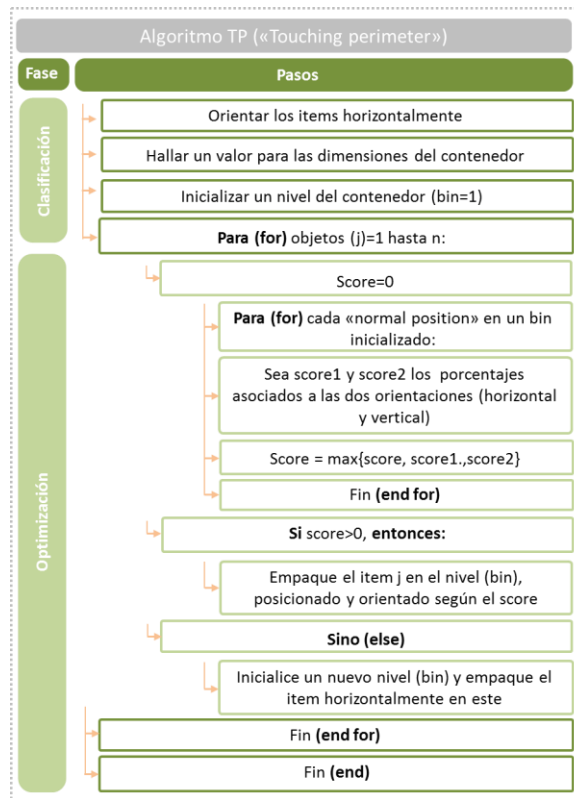
Restricciones para el algoritmo basadas en diseño para empaques			
Fase	Función	Restricción diseño para empaques	
Representación	Leer información geométrica de los objetos		
	Transformar en convexos los objetos	Se asumirá que las piezas son convexas para evitar que se enreden y/o atasquen (Se trabajará con los "convex hull" de las piezas)	
	Hallar posición estable de los objetos (centro geométrico, área de la base)	Las piezas serán posicionadas según el centro de gravedad y geometría para evitar tener que sostenerlas mientras se empaquen las demás (Ver anexo directrices diseño para empaques –C6-)	
Clasificación, manipulación, ubicación	Hallar el peso de los objetos		
	Clasificar las piezas según criterios	En la primera capa se ubicarán las piezas de mayor peso, posteriormente se ingresarán las siguientes	
	Inicializar contenedor		El contenedor en el que se van a empaclar las piezas será simétrico (Ver anexo directrices diseño para empaques –C11-)
			El contenedor será de un material no resbaladizo y rígido, su forma permanece sin tener que sostenerlo (Ver anexo directrices diseño para empaques . –C5-)
			El empaque se hará por la parte superior del contenedor (La dirección de empaque es el eje z del contenedor)
Ubicar las piezas por capas		Se debe optimizar cada capa de piezas que se ingrese al algoritmo.	
		El algoritmo optimizará cada capa del empaque independientemente para evitar que los objetos de la parte superior afecten la calidad de los de la capa inferior. La segunda capa empezaría en la parte más alta de la primera capa. Se asume que habrá una división entre cada una de estas.	
Optimización	Hallar la posición más óptima para cada pieza	Ubicación de la pieza en su posición estable en el empaque, de tal manera que contribuya con la disminución de volumen del contenedor.	

Fuente: Elaboración propia

Se analizaron algoritmos que estuvieran dentro de las variantes propuestas por Lodi & otros (2002), que permitieran la rotación de objetos, como FC ("Floor ceiling") que es basado en estrategias de "Best fit" (ver Tabla 12), pero finalmente se llegó a la conclusión del uso del algoritmo TP ("touching perimeter") propuesto por Lodi & otros (2002), ya que era posible empaclar en dos dimensiones sin hacerlo por capas; lo que representa mayor uso del espacio. Además, los resultados computacionales arrojados por este son mejores que los de algoritmos

como FC y AD (“alternate directions”) (Lodi & otros, 2002). En la Tabla 27 se encuentra una breve descripción del algoritmo.

Tabla 27 | Algoritmo TP (“Touching perimeter”)

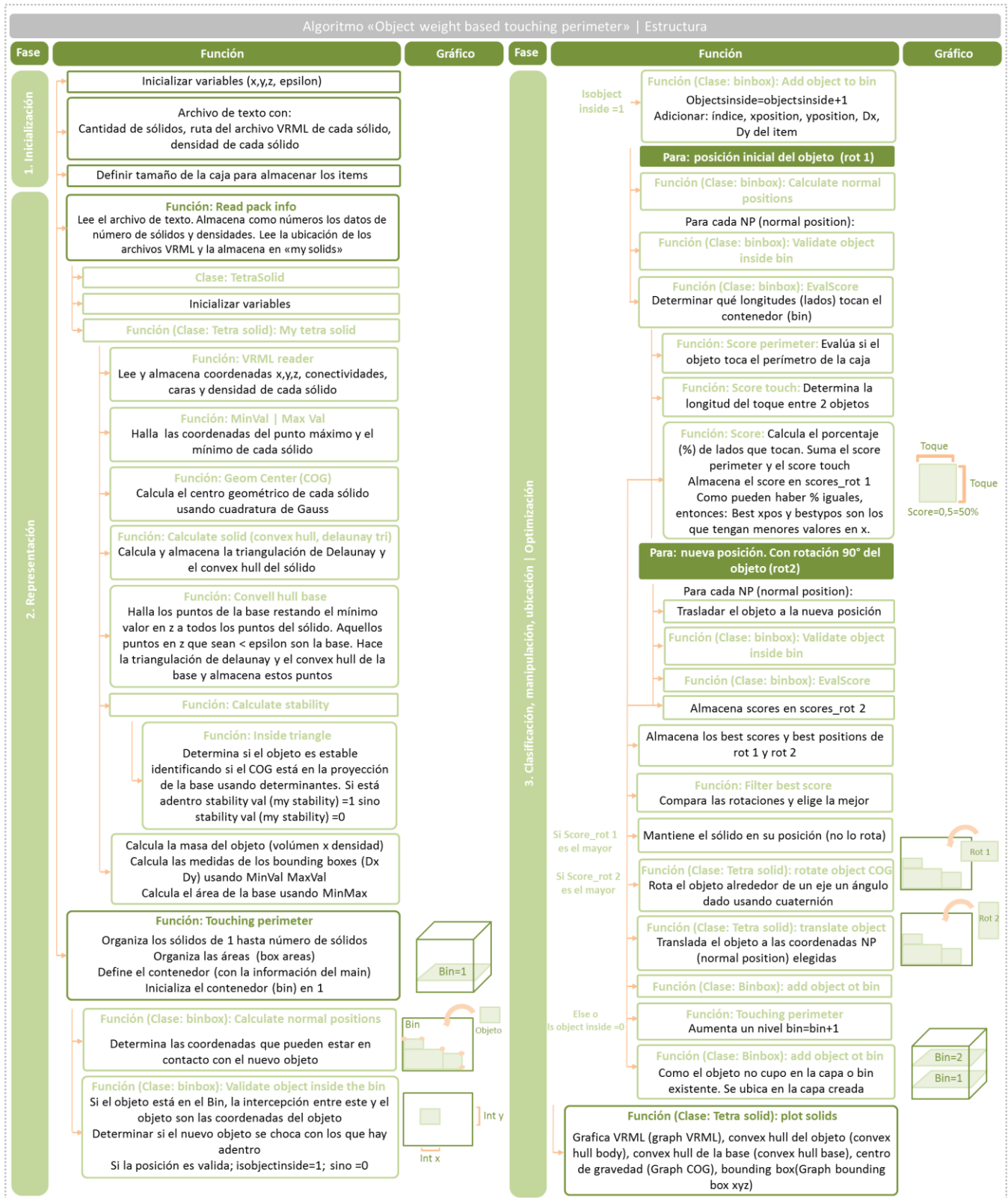


Fuente: Elaboración propia. Basado en: Lodi & otros (2002)

Lo anterior llevó a definir, por facilidad de implementación y agilidad computacional, que el empaque de cada capa se haría en dos dimensiones, utilizando el “bounding box” de los objetos, lo cual no afecta el resultado, porque la rotación alrededor de los ejes x e y no está permitida para garantizar la estabilidad, siendo esto garantía de que el “bounding box” siempre va a ser el mismo.

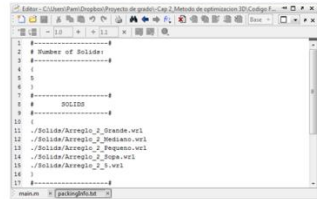
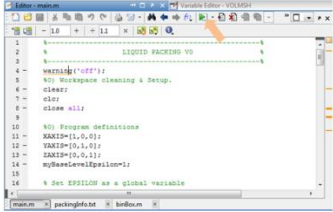
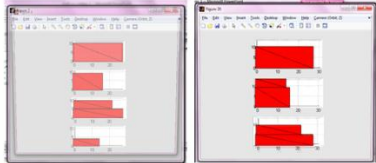
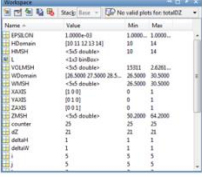
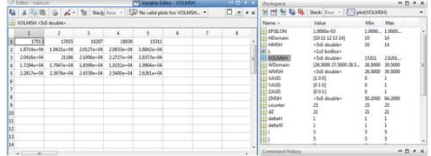
Teniendo en cuenta las restricciones y los algoritmos existentes mencionados previamente, se programó un algoritmo en Matlab, cuya descripción se encuentra en la Tabla 28, dividido en las fases de representación, clasificación y optimización. Las dos últimas se consolidaron en una única fase, ya que la optimización se realizó buscando mínimos locales con el algoritmo “touching perimeter” propuesto por Lodi & otros (2002), por lo tanto, cada objeto se ubica en la posición más óptima sin necesidad de reubicarlo. Finalmente, en la Tabla 29 se muestran los pasos a seguir para poner en funcionamiento el algoritmo desde Matlab. El nombre que se le dio al algoritmo es “object weight based layered touching perimeter”, el cual hace referencia a la restricción de peso, a que la distribución es por capas y al algoritmo existente implementado.

Tabla 28 | Descripción e implementación del algoritmo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 29 | Funcionamiento del algoritmo desde Matlab

Algoritmo Funcionamiento desde Matlab		
Fase	Función	Imagen
Inicialización	<p>Crear archivo de texto con: Cantidad de sólidos, ruta del archivo VRML de cada sólido, densidad de cada sólido.</p> <p>Guardarlo en la ruta donde se encuentra el algoritmo</p>	
	<p>Abrir Matlab, definir el «current folder» o la carpeta donde se encuentra el algoritmo y abrir el «Main».</p> <p>Correr el algoritmo desde el «Main»</p>	
Ejecución	<p>Se irán mostrando en la pantalla cada una de las iteraciones del programa.</p>	
Resultados	<p>Cuando finalice la ejecución, se podrán consultar los resultados en el «workspace» de Matlab: mínimo volumen encontrado (VOLMSH), altura (ZMSH), ancho (HMSH) y largo (WMSH) del empaque correspondiente al mínimo volumen</p>	
	<p>Si se desea conocer cuáles fueron los resultados para las demás iteraciones, se hace «doble click» en el nombre de la variable, y los resultados se muestran en una matriz en el editor</p>	

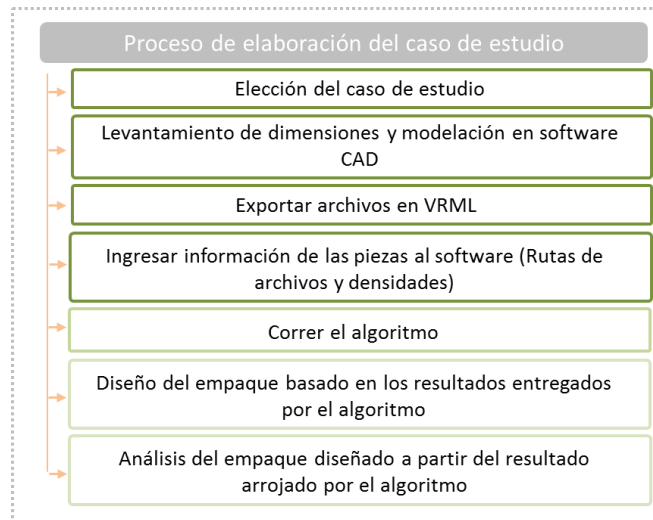
Fuente: Elaboración propia

4. Capítulo 4 | Caso de estudio

4.1. Elección del caso de estudio

El caso de estudio elegido para aplicarle el algoritmo de optimización, es el empaque de una vajilla de cerámica. Este es un producto que cumple con las restricciones tenidas en cuenta en la programación del algoritmo, ya que se compone por piezas frágiles que deben estar separadas entre ellas por capas de algún material que las proteja. El proceso que se llevó a cabo para la elaboración del caso de estudio se encuentra en la Tabla 30.

Tabla 30 | Proceso de elaboración del caso de estudio



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 31 están las imágenes de la caja que contiene la vajilla y la de cada una de las piezas con sus dimensiones generales. Cada conjunto de piezas con la misma forma está en un sub-empaque de cartón corrugado y el producto en su totalidad está también empacado en una caja de este material. Las dimensiones exteriores son 276mm de ancho, 205mm de fondo y 301mm de alto (volumen: 17030cm²).

Tabla 31 | Caja y piezas vajilla con sub empaque

Objeto caso de estudio Vajilla (Tipo 1)		
Empaque actual	Piezas	Piezas apiladas o pre empaçadas
 Ancho: 276 mm	 Pocillo 98x78x80 mm	 Pocillo 200x145x80 mm
 Alto: 301mm	 Plato hondo 157x157x50 mm	 Plato hondo 157x157x90 mm
 Fondo: 205mm	 Plato pequeño 140x140x10 mm	 Plato pequeño 140x140x40 mm
	 Plato mediano 210x210x10 mm	 Plato mediano 210x210x45 mm
	 Plato grande 265x265x20 mm	 Plato grande 265x265x60 mm

Fuente: Elaboración propia

4.2. Desarrollo del caso de estudio

El proceso que se llevó a cabo para el desarrollo del caso de estudio, el cual consiste en el diseño de dos posibles nuevos empaques para el producto elegido, parte de la consecución de las piezas de la vajilla, la modelación en un software CAD de cada grupo de piezas con sus diferentes posibilidades de agrupación, y finaliza con el diseño de los empaques y las piezas de protección.

En la Tabla 32, se documentó el proceso llevado a cabo y además, se encuentra el análisis de los resultados en los contextos de transporte y empaque y el cálculo de consumo de material.

Para el análisis del contexto de transporte se determinó, según el tamaño de la caja existente y las dos propuestas, cuántas podían ubicarse en un contenedor común de 20 pies. Para determinar el consumo de material, se halló el área de material requerido para el empaque y cada uno de los elementos de protección; y finalmente, para determinar el impacto en el contexto de empaque se realizó un ensayo con tres personas que no tienen experiencia en empaque de productos.

Tabla 32 | Proceso de diseño de empaques utilizando el algoritmo de optimización

Metodología propuesta para el diseño de empaques Caso de estudio					
Fase	Descripción	Recomendaciones	Solución propuesta 1	Solución propuesta 2	
Representación abstracta	Conseguir de piezas o modular las piezas en un software CAD	El software debe tener la opción de exportar las piezas como VRML o si no se tiene instalado un complemento que lo permita. Si se cuenta con las piezas físicas, se puede trabajar con estas los dos pasos siguientes.			
	Identificar cantidad de piezas iguales y agruparlas				
	Hacer posibles arreglos de cada grupo de piezas iguales, manualmente con mediante el software CAD*	Las piezas se pueden ubicar vertical y horizontalmente en los VRML. En el ejemplo 1 se evalúan las soluciones con las piezas horizontales y en el ejemplo 2 con las piezas verticales. El software propone soluciones de empaques por capas en el caso horizontal. Se ubica una capa sobre la otra (para este caso se sugiere que los arreglos tengan la menor altura posible). En el caso vertical, el software propone también empaque por capas, pero una al lado de la otra.			
	Validar arreglos con piezas físicas o prototipos	Se debe garantizar que cada arreglo esté en una posición estable (para que no haya que sostener las piezas mientras se empaquen las siguientes). Si no es así, se sugiere utilizar un sub-empaques que lo garantice. Para probar la premisa anterior se sugiere este paso, al cual no es obligatorio, pero se recomienda llevarlo a cabo, ya que el comportamiento de las piezas en la modelación 3D no siempre simula la realidad.			
	Modular arreglos en software CAD y exportar como VRML	El software debe tener la opción de exportar las piezas como VRML o si no se tiene instalado un complemento que lo permita. Se deben guardar los archivos VRML en el working folder del algoritmo.	Lista de nombres de archivos VRML: Arreglo_1_Platos_Grandes Arreglo_1_Platos_Medianos Arreglo_1_Platos_Pequeños Arreglo_1_Platos_Hondos Arreglo_1_Pírculos	Lista de nombres de archivos VRML: Arreglo_2_Platos_Grandes Arreglo_2_Platos_Medianos Arreglo_2_Platos_Pequeños Arreglo_2_Platos_Hondos Arreglo_2_Pírculos	
	Identificar posibles combinaciones de empaque para ingresar al software teniendo en cuenta el número de arreglos encontrados	En el caso en que las piezas se ubiquen horizontalmente desde el VRML, el algoritmo ubica una capa sobre la otra, aumentando la altura del empaque cada que se adiciona una nueva capa. Si las piezas se ubican verticalmente, se tendrá entonces un aumento del largo del empaque a medida que se ingresan las capas adicionales.	Combinaciones horizontales: Combinación I: Arreglo_1_Platos_Grandes, Arreglo_1_Platos_Medianos, Arreglo_1_Platos_Pequeños, Arreglo_1_Platos_Hondos, Arreglo_1_Pírculos Combinación III: Arreglo_1_Platos_Grandes, Arreglo_1_Platos_Medianos, Arreglo_1_Platos_Pequeños, Arreglo_1_Platos_Hondos, Arreglo_1_Pírculos Combinación IIII: Arreglo_1_Platos_Grandes, Arreglo_1_Platos_Medianos, Arreglo_1_Platos_Pequeños, Arreglo_1_Platos_Hondos, Arreglo_1_Pírculos Combinación IIIII: Arreglo_1_Platos_Grandes, Arreglo_1_Platos_Medianos, Arreglo_1_Platos_Pequeños, Arreglo_1_Platos_Hondos, Arreglo_1_Pírculos Combinación IIIIII: Arreglo_1_Platos_Grandes, Arreglo_1_Platos_Medianos, Arreglo_1_Platos_Pequeños, Arreglo_1_Platos_Hondos, Arreglo_1_Pírculos	Combinaciones verticales: Combinación IV: Arreglo_2_Platos_Grandes, Arreglo_2_Platos_Medianos, Arreglo_2_Platos_Pequeños, Arreglo_2_Platos_Hondos, Arreglo_2_Pírculos Combinación VII: Arreglo_2_Platos_Grandes, Arreglo_2_Platos_Medianos, Arreglo_2_Platos_Pequeños, Arreglo_2_Platos_Hondos, Arreglo_2_Pírculos	
Clasificación, implementación, optimización	Para cada combinación: Digitar la ruta de cada uno de los archivos de la combinación en el archivo de texto del algoritmo. Correr el algoritmo.				
	Identificar resultado arrojado por el software con menor volumen.	El volumen que entrega el software está en cm ³	Combinación 1: 18931cm ³ Combinación 2: 17403cm ³ Combinación 3: 18063cm ³	Combinación 4: 17403cm ³ Combinación 5: 16502cm ³ Combinación 6: 28737cm ³	Combinación IV: 17583cm ³ Combinación VII: 15313cm ³
	Para la combinación con menor volumen: Número de capas del empaque y piezas ubicadas en cada una de estas.	Esta información se requiere para el diseño del empaque y selección del material de relleno para la protección de las piezas.			
Diseño de empaques	Identificar ancho, fondo y altura del empaque entregados por el software.	Las dimensiones de ancho, fondo y alto del empaque se rescatan al final ya que pueden variar por el uso de material de relleno.	26.5cm Ancho 26.5cm Fondo 23.5cm Altura	50.2cm Ancho 30.5cm Fondo 10cm Altura	
	Ubicar las piezas en la capa respectiva en la parte central.	Se recomienda centrar las piezas, pero esta ubicación puede cambiar dependiendo del material de relleno a elegir.			
	Elegir material de relleno	Posibles materiales de relleno: Espuma de poliuretano Bolsa de aire con un tap perforado Algodón lavable Pírculos Dibujos en cartón Malla de PE expandida Para evitar el movimiento de las piezas durante el transporte, se elige un relleno que no fuera suelto: cartón corrugado.	Para evitar el movimiento de las piezas durante el transporte, se elige un relleno que no fuera suelto: cartón corrugado.	Para evitar el movimiento de las piezas durante el transporte, se elige un relleno que no fuera suelto: cartón corrugado.	
Consumo y validación Empaques 3D empaques	Definir material de protección para cada arreglo de piezas.	Posibles materiales de protección: Papelón carton Malla de PE expandida Bolsas Entre las piezas: Cartón delgado o papel Entre capas o piezas (y para evitar movimientos): Cartón corrugado	Entre las piezas: Cartón delgado o papel Entre capas o piezas (y para evitar movimientos): Cartón corrugado	Entre las piezas: Cartón delgado o papel Entre capas o piezas (y para evitar movimientos): Cartón corrugado	
	Geometriz material de relleno para cada capa (si aplica) o calcular volumen de relleno suelto necesario.		 Ancho: 26.5 cm, Fondo: 26.5 cm, Alto: 23.5 cm Ancho: 26.5 cm, Fondo: 26.5 cm, Alto: 23.5 cm Ancho: 26.5 cm, Fondo: 26.5 cm, Alto: 23.5 cm Ancho: 26.5 cm, Fondo: 26.5 cm, Alto: 23.5 cm Ancho total: 26.9cm, Fondo total: 26.9cm, Alto total: 24.3cm	 Ancho: 26.7cm, Fondo: 30.5cm, Alto: 10cm Ancho: 15.3cm, Fondo: 30cm, Alto: 10cm Ancho: 8.4cm, Fondo: 10cm, Alto: 10cm Ancho total: 50.6cm, Fondo total: 81.5cm, Alto total: 10.4cm	
	Calcular consumo total de cada material necesario para el empaque	Tener en cuenta material de protección, de relleno y empaques.	Consumo total (cartón corrugado): 8895.5cm ³ Consumo total (cartón): 4656cm ³ Consumo total (papel): 4699cm ³ Consumo total material: 18450cm ³ Ver gráfico: análisis empaque actual y propuestos	Consumo total (cartón corrugado): 4676cm ³ Consumo total (cartón): 4752.26cm ³ Consumo total (papel): 4699cm ³ Consumo total material: 14077cm ³ Ver gráfico: análisis empaque actual y propuestos	
Consumo y validación Empaques 3D empaques	Validar resultado vs. Empaque existente (si lo hay)	Cuando los materiales del empaque actual y el nuevo, sean diferentes, se hace necesario hacer este comparativo basado en los costos de los materiales utilizados	Consumo actual material: 17979.7cm ³ Consumo Ejm 1: 13450cm ³ 25% menos material (con respecto al actual)	Consumo actual material: 17979.7cm ³ Consumo Ejm 2: 14077cm ³ 21% menos material (con respecto al actual)	
	Realizar pruebas de tiempos de empaque y desempaques de las piezas	Se sugiere probar el instructivo de empaque en esta etapa del proceso, para validarlo y garantizar que la información sea clara. Las personas deben ser previamente instruidas en cada uno de los procesos de empaque.	Actual: Tiempo promedio empaque: 2.11min, Tiempo promedio desempaques: 1.22min Ejemplo 1: Tiempo promedio empaque: 1.37min, Tiempo promedio desempaques: 1.24min Ver gráfico: análisis empaque actual y propuestos	Actual: Tiempo promedio empaque: 2.11min, Tiempo promedio desempaques: 1.22min Ejemplo 2: Tiempo promedio empaque: 1.20min, Tiempo promedio desempaques: 1.44min Ver gráfico: análisis empaque actual y propuestos	
	Para el tamaño de empaque final, hallar la cantidad de empaques que pueden ser ubicados en un contenedor de 20 x 40 pies, según la necesidad.	Para la ubicación de empaques en el contenedor, puede también utilizarse el algoritmo.	Cantidad de empaques que pueden ubicarse en un contenedor de 20 pies*: 1512 *Dimensiones internas contenedor: 589.8 x 235.2 x 239.3 cm Cantidad actual: 1617 Diferencia: -105 (8.4% menos cantidad)	Cantidad de empaques que pueden ubicarse en un contenedor de 20 pies*: 1774 *Dimensiones internas contenedor: 589.8 x 235.2 x 239.3 cm Cantidad actual: 1617 Diferencia: +157 (8.8% más cantidad)	
Consumo y validación Empaques 3D empaques	Validar resultado vs. Empaque existente (si lo hay)				

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el ensayo, se le entregó a cada persona un instructivo (ver Anexo 5) en el que se explicaba el procedimiento a seguir para cada empaque, además, se les explicó verbalmente y empacaron la vajilla en las tres cajas sin contabilizar tiempos, con el fin de entender las instrucciones y la orientación de las piezas. Para el empaque existente, se creó una réplica de la caja en cartón corrugado, para evitar que quienes estuvieran realizando la prueba, identificaran el empaque actual del producto y así garantizar que los resultados fueran fiables.

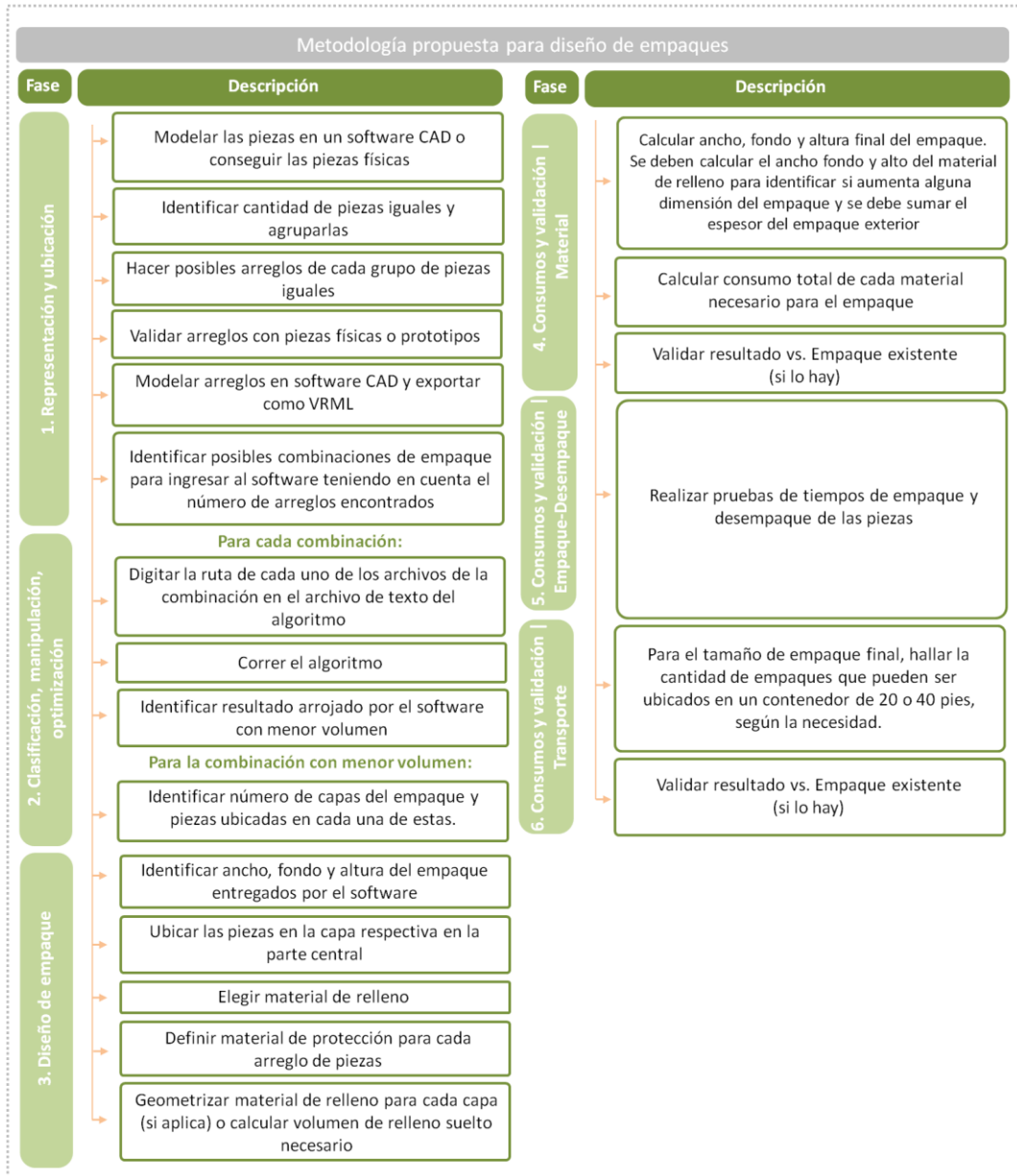
Posteriormente, se realizó la prueba. En esta se le entregaban a la persona las piezas, la caja y los elementos de protección organizados según la secuencia de empaque y se tomó el tiempo de empaque y desempaque a cada una con las tres vajillas. Este se documentó en la Tabla 33 con los demás resultados y además, el tiempo se promedió y se documentó en la Tabla 32.

4.3. Resultados del caso de estudio

El procedimiento que se expuso en la Tabla 32, se documentó inicialmente para el primer empaque propuesto. Para el segundo, se siguieron los mismos pasos, para así probar el proceso y proponer, como resultado del proyecto, una metodología de diseño de empaques cuyas herramientas son el uso de software CAD, piezas reales, modelos o prototipos y el algoritmo desarrollado. Esta puede verse en la Tabla 33.

Para sintetizar los resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo y de la metodología presentada, se elaboró la Tabla 34. En esta se encuentra el análisis del empaque actual y los dos empaques propuestos, se identifican las ventajas de cada uno frente a los demás y se encuentran los tiempos de empaque obtenidos en el ensayo realizado.

Tabla 33 | Metodología propuesta para la optimización y diseño de empaques



Fuente: elaboración propia

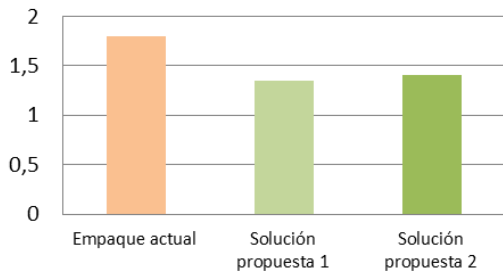
Tabla 34 | Análisis empaque existente y propuestos

Análisis empaque actual y propuestos								
Tipo	Empaque actual		Solución propuesta 1		Solución propuesta 2			
Caja principal	 Volumen:17030cm ³ Consumo:3900cm ²	Doblado Ancho: 27.6cm Largo: 20.5cm Alto: 30.1cm Desarrollo Ancho: 70cm Largo: 54cm Espesor: 0.2cm Material: Cartón corrugado	 Volumen:17583cm ³ Consumo:3895.5cm ²	Doblado* Ancho: 26.9(26.5)cm Largo: 26.9(26.5)cm Alto: 24.3(23.5)cm Desarrollo Ancho: 76.5cm Largo: 106cm Espesor: 0.2cm Material: Cartón corrugado	 Volumen:16576cm ³ Consumo:4676cm ²	Doblado* Ancho: 31.5(30.5)cm Largo: 50.6(50.2)cm Alto: 30.4(10)cm Desarrollo Ancho: cm Largo: 161.4cm Espesor: 0.2cm Material: Cartón corrugado		
<small>*Las dimensiones de estos empaques contemplan el material de protección, por esto, son mayores a las entregadas por un software, las cuales se muestran entre paréntesis.</small>								
Mejor empaque = Menor volumen caja principal								
Protección platos grandes	 Consumo: 2339.6cm ²	Desarrollo Ancho: 38.7cm Largo: 66cm Material: Cartón Separadores Ancho: cm Largo: cm Material: Papel craft Cantidad:	 Consumo: 702.25cm ²	Desarrollo Ancho: 28.5 cm Largo: 26.5 cm Material: Cartón Separadores Ancho: cm Largo: cm Material: Papel craft Cantidad:	 Consumo: 1248cm ²	Desarrollo Ancho: 32cm Largo: 39cm Material: Cartón Separadores Ancho: 27cm Largo: 27cm Material: Papel craft Cantidad:		
Protección platos medianos	 Consumo: 1489.06cm ²	Desarrollo Ancho: 30.8cm Largo: 53.2cm Material: Cartón Separadores Ancho: 20cm Largo: 20cm Material: Papel craft Cantidad:	 Consumo: 1260.25cm ²	Desarrollo Ancho: 35.5cm Largo: 35.5cm Material: Cartón Separadores Ancho: 20cm Largo: 20cm Material: Papel craft Cantidad:	 Consumo: 1331.25cm ²	Desarrollo Ancho: 35.5cm Largo: 37.5cm Material: Cartón Separadores Ancho: 20cm Largo: 20cm Material: Papel craft Cantidad:		
Protección platos pequeños	 Consumo: 773.7cm ²	Desarrollo Ancho: 20.3cm Largo: 39cm Material: Cartón Separadores Ancho: 14cm Largo: 14cm Material: Papel craft Cantidad:3	 Consumo: 1156cm ²	Desarrollo Ancho: 34cm Largo: 34cm Material: Cartón Separadores Ancho: 14cm Largo: 14cm Material: Papel craft Cantidad:3	 Consumo: 546cm ²	Desarrollo Ancho: 14cm Largo: 39cm Material: Cartón Separadores Ancho: 14cm Largo: 14cm Material: Papel craft Cantidad:3		
Protección platos bonito	 Consumo: 1501.12cm ²	Desarrollo Ancho: 33.3cm Largo: 51.2cm Material: Cartón Separadores Ancho: 19cm Largo: 19cm Material: Papel craft Cantidad:	 Consumo: 810cm ²	Desarrollo Ancho: 38cm Largo: 45cm Material: Cartón Separadores Ancho: 19cm Largo: 19cm Material: Papel craft Cantidad:	 Consumo: 527cm ²	Desarrollo Ancho: 15.5cm Largo: 34cm Material: Cartón Separadores Ancho: 19cm Largo: 19cm Material: Papel craft Cantidad:		
Protección picos	 Consumo: 1508cm ²	Desarrollo Ancho: 33cm Largo: 69.6cm Material: Cartón Separadores Ancho: 7.5cm Largo: 45.5cm Material: Cartón Cantidad:	 Consumo: 927.5cm ²	Desarrollo Ancho: 26.5cm Largo: 35cm Espesor: cm Separadores Ancho: 11cm Largo: 11cm Material: Papel craft Cantidad:3	 Consumo: 1050cm ²	Desarrollo Ancho: 30cm Largo: 35cm Material: Cartón Separadores Ancho: 11cm Largo: 11cm Material: Papel craft Cantidad:3		
Material de relleno	 Consumo: 693cm ² Consumo: 466cm ² Consumo: 630cm ²	Desarrollo Ancho: 21cm Largo: 33cm Ancho: 18cm Largo: 26cm Ancho: 14cm Largo: 45cm Material: Cartón	No aplica	Desarrollo Ancho: cm Largo: cm Espesor: cm Separadores Ancho: cm Largo: cm Espesor: cm Cantidad:	No aplica	Desarrollo Ancho: cm Largo: cm Espesor: cm Separadores Ancho: cm Largo: cm Espesor: cm Cantidad:		
Consumo material	Consumo total (cartón corrugado): 3900cm ² Consumo total (cartón):9743.73cm ² Consumo total (papel):4336cm ² Total material: 17979.73cm ²		Consumo total (cartón corrugado): 3895.5cm ² Consumo total (cartón):4856cm ² Consumo total (papel):4699cm ² Total material: 13450cm ²		Consumo total (cartón corrugado):4676cm ² Consumo total (cartón):4702.25cm ² Consumo total (papel):4699cm ² Total material: 14077cm ²			
			Diferencia con empaque actual: 25% menos material Diferencia con Ejemplo 2: 4.45% menos material		Diferencia con empaque actual: 21% menos material			
Mejor empaque = Menor consumo de material								
Tiempo empaque Desempaquete	 Persona A	 Persona B	 Persona C	 Persona A	 Persona B	 Persona C		
Tiempo empaque Persona A: 2,02min Persona B: 2,26min Persona C: 2,06min Promedio: 2,11min		Tiempo empaque Persona A: 1,22min Persona B: 1,23min Persona C: 1,18min Promedio: 1,21min		Tiempo empaque Persona A: 1,45min Persona B: 1,41min Persona C: 1,27min Promedio: 1,37min		Tiempo empaque Persona A: 1,19min Persona B: 1,19min Persona C: 1,23min Promedio: 1,20min		
			Diferencia con empaque actual: 35% menos tiempo		Diferencia con empaque actual: 43,1%menos tiempo Diferencia con Ejemplo 2: 12,4%menos tiempo			
Mejor empaque = Menor tiempo empaque								
Cantidad de piezas de empaque	Caja + Piezas de protección: 6und		Caja + Piezas de protección: 5und		Caja + Piezas de protección: 5und			
Material de relleno: 3und		Separadores: 12und		Material de relleno: 0		Separadores: 15und		
Total:21und			Total:20und			Total:20und		
Mejor empaque = Menor cantidad de piezas								
Transporte	Cantidad de empaques que pueden ubicarse en un contenedor de 20 pies*: 1611 <small>*Dimensiones internas contenedor: 589,8 x 235,2 x 239,3 cm</small>		Cantidad de empaques que pueden ubicarse en un contenedor de 20 pies*: 1512 <small>*Dimensiones internas contenedor: 589,8 x 235,2 x 239,3 cm</small>		Cantidad de empaques que pueden ubicarse en un contenedor de 20 pies*: 1774 <small>*Dimensiones internas contenedor: 589,8 x 235,2 x 239,3 cm</small>			
Diferencia con Ejemplo 1: 6,49% mas cantidad			Diferencia con Ejemplo 1: 14,7% mas cantidad Diferencia con empaque actual: 8,85% mas cantidad			Diferencia con Ejemplo 1: 14,7% mas cantidad Diferencia con empaque actual: 8,85% mas cantidad		
Mejor empaque = Mayor número de cajas por contenedor								

Fuente: Elaboración propia

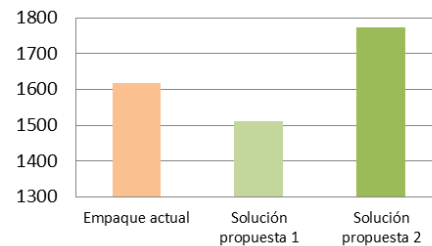
De esta tabla puede concluirse que el mejor empaque es la segunda solución propuesta del caso de estudio (ver Tabla 32), ya que a pesar de tener un consumo de material un 4,45% mayor que el del primer empaque propuesto, es 21% menor al del empaque actual (Ver Figura 14) y además tiene el menor volumen de los tres empaques, lo cual representa un mejor aprovechamiento del espacio para el transporte, ya que hay un 8,85% más aprovechamiento de un contenedor que el empaque actual (Ver Figura 15). Finalmente, el tiempo de empaque se mejora en un 43,1%, lo que al igual que los demás aspectos representaría un ahorro para la compañía y reduce el impacto al medio ambiente (Ver Figura 16).

Figura 14 | Consumo de cartón
Consumo de cartón (m²)



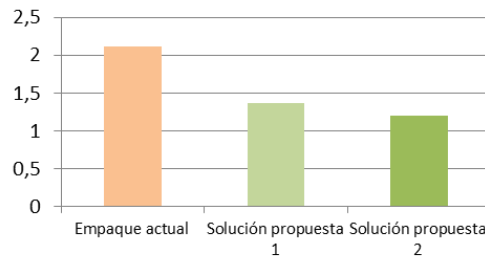
Fuente: Elaboración propia

Figura 15 | Cantidad de cajas por contenedor
Cantidad de cajas por contenedor



Fuente: Elaboración propia

Figura 16 | Tiempo de empaque
Tiempo de empaque (minutos)



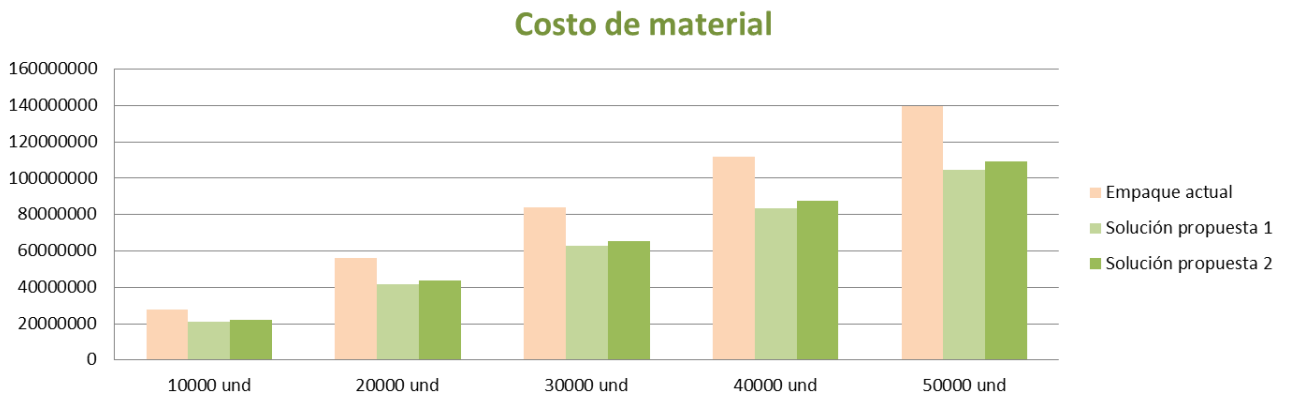
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos, representan también un ahorro en costos de material, transporte y mano de obra. En las gráficas que se muestran a continuación, se encuentra la relación del costo de los tres aspectos mencionados, consumo de material (Ver Figura 17), transporte (Ver Figura 18) y mano de obra (Ver Figura 19) para cada uno de los empaques, suponiendo producciones desde 10.000 hasta 50.000 unidades anuales⁸. Para la elaboración de estas, se tuvo en cuenta un costo

⁸ Valores aproximados hallados a partir del artículo “Corona sirve las mesas en el mundo” (El Colombiano, 2012) el cual menciona que la producción anual de Corona es de 45’000.000 piezas. Se supone que cada vajilla tiene 20 piezas. Por lo tanto serían 2’250.000 vajillas al año. Teniendo en cuenta que en el artículo dice que son 15 líneas de producto para el

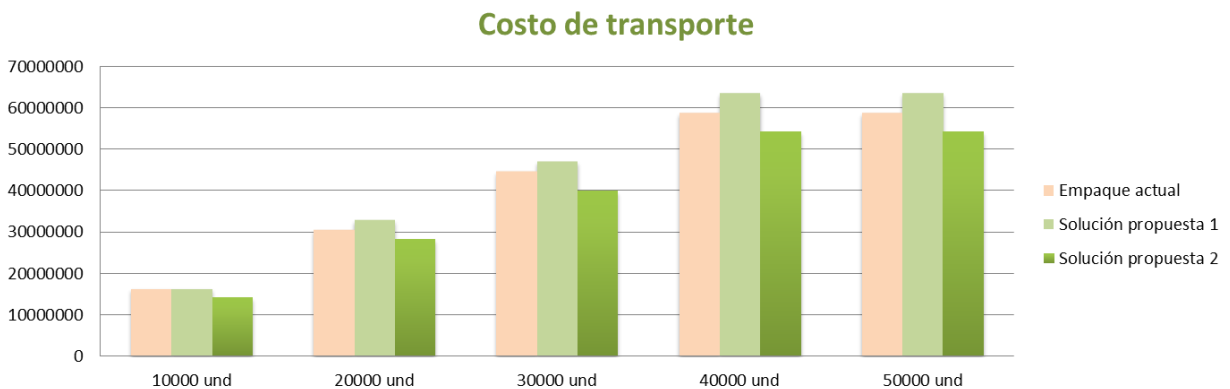
del metro cuadrado de cartón corrugado de \$1.555 (Fuente: Cartón de Colombia), se supuso un trayecto de transporte de Medellín a Buenaventura, con un costo de \$2'360.000 (Fuente: TDM) y que cuando un contenedor no estuviera completo, se pagaría como si lo estuviera. Por último, se asumió el salario mínimo legal vigente (\$589.500) para el costo de la mano de obra, el cual representa un valor diario, por 8 horas de trabajo de \$19.650, sin tener en cuenta el auxilio de transporte.

Figura 17 | Unidades producidas vs. Costo del material



Fuente: Elaboración propia

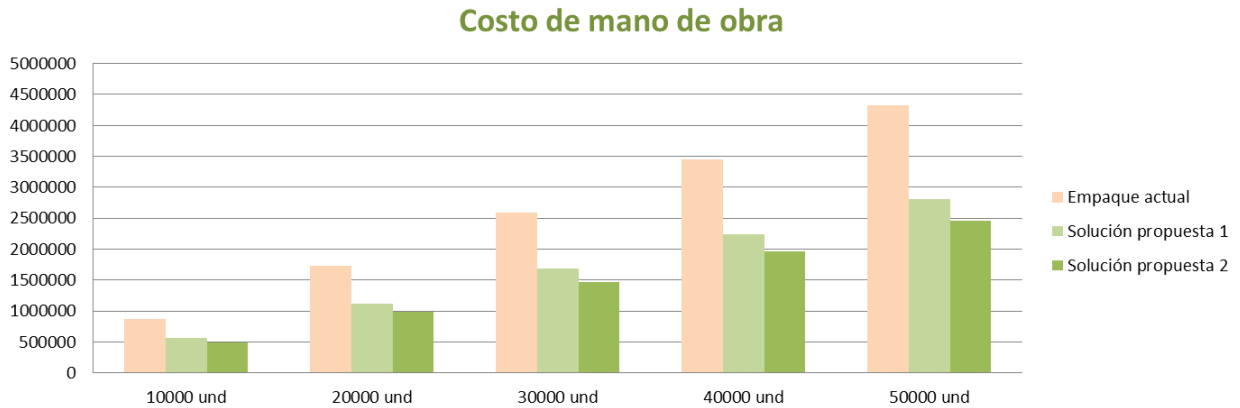
Figura 18 | Unidades producidas vs. Costo del transporte



Fuente: Elaboración propia

hogar y 40 para el segmento institucional, y si se supone que se fabrica el mismo número de vajillas por referencia, serían 40.909 vajillas por cada una de estas.

Figura 19 | Unidades producidas vs. Costo de la mano de obra de empaque



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta el análisis de costos realizado, el porcentaje de ahorro en costos es lineal y equivale a un 21,7% en consumo de material y a un 43,1% en mano de obra. En el caso del transporte, como se supuso que se asumiría el costo del espacio vacío de los contenedores, el ahorro es variable y equivale al 14,2% para 10.000 unidades, 7,7% para 20.000, 10,5% para 30.000 y 8% para 40.000 y 50.000 unidades; lo cual equivale a un promedio de 9,7%.

Según las suposiciones sobre el número de unidades producidas al año para una referencia de vajillas de Corona, una empresa local, el ahorro sería de \$30'484.919 al año, que corresponden a \$4'720.000 en transporte, \$24'274.794 en consumo de material y \$1'490.125 en mano de obra. Además, el ahorro en material para 40.000 unidades equivale a 15.610m², lo cual representa mejoras en el impacto ambiental, ya que se consumirían 3.423 láminas menos de cartón corrugado (se asume un tamaño de lámina de 2,4m x 1,9m y que no hay desperdicio).

5. Conclusiones y recomendaciones

- A partir del objetivo general del proyecto, se planteaba la hipótesis que contar con un algoritmo de optimización de empaques basado en lineamientos de diseño para el ensamble, permitiría tener ahorros en espacio de almacenamiento, tiempo de empaque y transporte. Esta fue validada y probada mediante el desarrollo de una metodología de optimización y diseño de empaques a través de un caso de estudio que consistía en el rediseño del empaque de una vajilla y cuyos resultados representaron ahorros de 21,7% en consumo de material, 43,1% en mano de obra y 9,7% en transporte aproximadamente. Las mejoras obtenidas, pudieron llevarse a cabo ya que los problemas de ubicación de las piezas y optimización del volumen se solucionaron mediante el algoritmo de optimización, por lo tanto, se pudo emplear más tiempo en el diseño del empaque y los elementos de protección. Resultados que llevan a afirmar la aplicabilidad del método de optimización y diseño de empaques en la industria.
- La metodología utilizada para la búsqueda y revisión de artículos científicos, permitió conocer algunos de los métodos de optimización existentes aplicados al problema de corte y empaque, los cuales se analizaron para la elección del método a aplicar en el desarrollo del algoritmo, basado en el interés en el tema durante los últimos 20 años y la aplicabilidad de estos. Por otro lado, en la búsqueda de publicaciones relacionadas con el área de diseño para empaques, sólo se encontró un artículo que hace una analogía entre el diseño para el ensamble y el diseño para empaques, el cual se complementó mediante el análisis de lineamientos desarrollados por otros autores.
- Los artículos encontrados de soluciones computacionales para el problema de empaque en 3 dimensiones no tienen en cuenta restricciones de diseño para el ensamble ni de estabilidad de las piezas, aspectos que si se tuvieron en cuenta en el desarrollo de este proyecto y garantizan la aplicabilidad de la solución en la industria; además, esta implementación representa un aporte al conocimiento y a la comunidad científica.
- El procedimiento empleado para el desarrollo del algoritmo facilitó la implementación de este, ya que se utilizó un método de programación estructurado que consistió en dividir el problema en sub-problemas y la solución a cada uno de estos se basó en los hallazgos y análisis elaborados previamente en el estado del arte, donde se habían identificado los algoritmos con más información disponible y los más empleados en los últimos años. La integración de estas soluciones y la aplicación de los lineamientos de diseño para el ensamble en el desarrollo del algoritmo, constituyen un aporte al conocimiento, ya que las soluciones encontradas en el estado del arte son viables matemáticamente, pero no lo son en la

industria, ya que presentan dificultades al empaquetar las piezas por la distribución y ubicación de estas.

- El resultado entregado por el algoritmo no debe considerarse como un caso aislado. Para evaluar la viabilidad del resultado debe tenerse en cuenta que el empaque hace parte de una cadena, por lo tanto debe diseñarse a partir del resultado entregado por el algoritmo, calcular la cantidad de material del empaque y los elementos de protección, el tiempo de empaque y desempaque (si aplica) y finalmente, la cantidad de productos que pueden empaquetarse en un contenedor o en el medio de transporte que sea utilizado para llevar el producto de un lugar a otro.
- El procedimiento utilizado para el desarrollo de la metodología de optimización y diseño de empaques fue exitoso, ya que se facilitó el proceso al documentarlo a medida que se desarrollaba la primera solución propuesta del caso de estudio. Además, al probarlo con la segunda solución, se validó este procedimiento garantizando su aplicabilidad.
- La inclusión en la metodología propuesta para el diseño de empaques de un análisis del posicionamiento de los componentes, utilizando las piezas reales, modelos o prototipos, permitió simular diferentes escenarios de ubicación de las piezas identificando el comportamiento de estas teniendo en cuenta la gravedad, garantizando así, que su ubicación dentro del empaque fuera estable, análisis que no fue posible realizar con los modelos virtuales en tres dimensiones.

Recomendaciones y trabajo futuro

- Implementar el algoritmo propuesto en tres dimensiones permitiría obtener resultados más óptimos ya que las piezas no estarían ubicadas por capas. Teniendo en cuenta los resultados del caso de estudio, podrían esperarse mejoras alrededor del 5% en reducción de volumen, pero en casos en que las piezas tengan diferencias de alturas considerables entre ellas (por ejemplo, cuando una de las piezas tiene más del doble de altura que las demás) esta reducción de volumen tiende a ser mayor. Debe tenerse en cuenta que si se trata de piezas frágiles existirán casos en que las capas serán necesarias para evitar daños en el producto.
- Se propone diseñar una interfaz de usuario para el manejo del algoritmo con las instrucciones necesarias, y que los resultados sean entregados en un reporte al final de la simulación, donde queden consignadas las posibles soluciones propuestas en un archivo adicional, para que el diseñador de empaques pueda consultarlo sin necesidad de ejecutar de nuevo el programa, ya que actualmente los resultados quedan almacenados en la memoria de Matlab y se eliminan en el momento de correr una nueva simulación.

6. Fuentes

- Andreassen, M., Myrup, S., & Kähler, T. (1983). *Design for assembly*. IFS Publications Ltd.
- Azzi, A., Battini, D., Persona, A., & Sgarbosa, F. (2012). Packaging Design: General Framework and Research Agenda. *Packaging technology and science*, 435–456.
- Bennell, J. A., & Oliveira, J. (2006). The geometry of nesting problems: A tutorial. *European Journal of Operational Research*, 184, 397–415.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Winston, A. K. (2002). *Product design for manufacture and assembly*. New York: Marcel Deker.
- Chen, E., Lai, J., Wang, Y., & Hsiao, C. (2006). Thermal design guidelines for FC-BGA package with hot spot problem. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- Chen, J., Zhang, Y., & Sun, J. (2011). An overview of the reducing principle of design of corrugated box used in goods packaging. *3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, ESIAT*.
- Chena, J., & otros. (2011). An Overview of the Reducing Principle of Design of Corrugated Box Used in Goods Packaging. *2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT)*.
- Chernov, N., Stoyan, Y., & Romanov, T. (s.f.). Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem.
- Duque, J. (2012). *Fixed grid meshing implementation for interactive analysis*. Medellín: Applied mechanics laboratory, Universidad EAFIT.
- Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44.
- Egeblad, J., Nielsen, B., & Odgaard, A. (2006). Fast neighborhood search for two and three-dimensional nesting problems. *European Journal of Operational Research*.
- El Colombiano*. (1 de Julio de 2012). Recuperado el 1 de Agosto de 2013, de <http://movil.elcolombiano.com/article/61044>
- Foster, N. F., Dulikravich, G. S., Martin, T. J., & Halderman, J. D. (1994). Interactive multidisciplinary analysis, design and optimization (MDA&O) approach to electronic packaging. *Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.
- Gerber, M., & Dreiza, M. (1996). Stacked-chip-scale-package-design guidelines. *EDN*, 79-84.

- Gerhard, W., Haußner, H., & Schumann, H. (2006). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183.
- Gomes, M., & Oliveira, J. (14 de Octubre de 2004). Solving Irregular Strip Packing problems by hybridising simulated annealing and linear programming.
- Grönman, K., Soukka, R., Järvi-Kääriäinen, T., Katajajuuri, J., Kuisma, M., Koivupuro, H., y otros. (2012). Framework for Sustainable Food Packaging Design. *Packaging Technology and Science*.
- Haiyan-Huang. (2012). A research on simplifying packaging design. *International Conference on Energy and Environmental Protection*.
- Hopkins, D. (1998). A framework for developing power electronics packaging. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*.
- Huang, H. (2012). A research on simplifying packaging design. *Advanced materials research*, 836-841.
- Imahori, S., & otros. (2006). Practical Algorithms for Two-dimensional Packing. *Mathematical engineering technical reports*.
- Iori, M., Martello, S., & Monaci, M. (2001). *Metaheuristics algorithm for the strip packing problem*. Bologna, Italy: Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica, Università di Bologna.
- Jens, E., Benny K., N., & Allan, O. (30 de September de 2004). Fast neighborhood search for two and three-dimensional nesting problems. *University of Copenhagen*.
- Jie, M. (2011). Probing concepts of sustainable package design. *International Conference on Automation and Robotics*.
- John K., D., & George K., K. (s.f.). A moment based metric for 2D and 3D packing. *University of Western Ontario*.
- Khaled , N. (15 de Enero de 2009). *MAtworks*. Recuperado el Marzo de 2013, de http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22690-inside-triangle/content/inside_triangle.m
- Labbe, D., & Martin, N. (2011). Design of package artworks for pleasurable food experience by a user centric approach. *Conference on Designing Pleasurable Products and Interfaces*.
- Lee, R. K., Montero, M. G., & Wright, P. K. (2003). Design methodology for the thermal packaging of hybrid electronic- mechanical products: A Case Study on the Berkeley Emulation Engine (BEE). *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*.

- Lee, S., & Lye, S. (2003). Design for manual packaging. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*; 2003; 33, 1/2; ProQuest, 163.
- Lodi, A., & otros. (2002). Recent advances on two-dimensional bin packing problems. *Discrete Applied Mathematics*, 123.
- Lodi, A., Martello, S., & Vigo, D. (2002). Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research*, 141.
- Malaver, F., Vargas M. (2007). Vigilancia tecnológica y competitividad sectorial: lecciones y resultados de cinco estudios. *Universidad Javeriana*.
- Martínez, J. & otros (2009). El libro azul - Apuntes de ingeniería y diseño. *Universidad EAFIT*
- Mininni, T. (2012). 5 ways to break the rules in packaging design. *Packaging Digest*.
- Nadpara, N., Thumar, R., & Kalola, V. (2012). Quality by design (QBD): A complete review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*.
- Nielsen, B., & Odgaard, A. (2003). *Fast Neighborhood Search for the Nesting Problem*. Copenhagen: University of Copenhagen.
- Ningbin, Y. (2012). Application of ergonomics principles in the packaging machinery design. *2nd International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, ADME*.
- Oliveira, J., & Gomez, M. (2001). A 2-exchange heuristic for nesting problems. *European journal of operational research*, 359-370.
- Oliveira, J., Gomes, A., & Ferreira, J. (2000). TOPOS – A new constructive algorithm for nesting problems. *OR Spektrum*.
- Osogami, T. (1998). Approaches to 3D Free-Form Cutting and Packing Problems and Their Applications: a Survey. *IBM Research, Tokyo Research Laboratory*.
- Pahl, G., Beitz, W., Schulz, H., & Jarecki, U. (2007). *Engineering Design. A Systematic Approach*. Springer.
- Pecht, M., Barker, D., & Dasgupta, A. (1993). Approach to the development of package design guidelines. *International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, 217-240.
- Rivero, F. (13 de Abril de 2013). *Geometría computacional*. Obtenido de Universidad de Los Andes Venezuela.
- Ruiz, O. (s.f.). *Underlying topics on CAD/CAM/CG* (1 ed.). Medellín: Universidad EAFIT.

- Saghir, M. (2004). The concept of packaging logistics. *Second World Conference on POM and 15th Annual POM Conference*. México.
- Simms, C., & Trott, P. (2010). Packaging development: A conceptual framework for identifying new product opportunities. *Marketing Theory*, 397.
- Simms, C., & Trott, P. (2010). Packaging development: A conceptual framework for identifying new product opportunities. *Marketing Theory*.
- Stoyan, Y. G. (s.f.). Mathematical Models for Optimization Packing 3-D Problems. *National Ukrainian Academy of Sciences*.
- Tao, S., & Zhong, Y. (2012). Research and development of green packaging structure design. *Advanced Science Letters*, 225-228.
- Waescher, G., & otros. (2005). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operations Research*.
- Wäscher, G., Heike, H., & Holger, S. (2004). An improved typology of cutting and packing problems. *Otto-von-Guericke University*.
- Wen-Chen Leea, H. M.-W. (2007). A heuristic for nesting problems of irregular shapes. *Computer aided design*.
- Xie, S., Wang, G., & Liu, Y. (2007). Nesting of two-dimensional irregular parts: an integrated. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.
- Yiangkamolsing, C., & otros. (2010). Universal Design (UD) Principles for Flexible Packaging and Corresponding Minimal Customer Requirement Set. *Packaging technology and science*, 283–300.

Fuentes Figura 2 | Rellenos para proteger los productos

- Alibaba*. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de http://www.alibaba.com/product-gs/278490622/Beer_packaging_box.html
- Cactus corrugated containers*. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de www.cactuscontainers.com/packaging-supplies/custom-foam-inserts/custom-foam-inserts.asp
- Direct Industry*. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://www.directindustry.com/prod/nefab/paper-packaging-materials-15683-101181.html>
- Easy Fairs*. (2012). Recuperado el 2012 de 13 de Mayo, de http://www.easyfairs.com/events_216/empack-brussels2012_27517/empack-brussels-2012_27518/visitors_27519/exhibitor-catalogue_27528/stand/360978/

fstop57. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://fstop57.com/freshstock/stock-photo-of-packaging-materials/stock-photo-fragile-packaging-2386>

Fuentes Tabla 9 | Ejemplos de problemas “bin packing” y “nesting”

AcoLab. (2013). Recuperado el 7 de Abril de 2013, de http://acolab.ie.nthu.edu.tw/?page_id=723

Brothersoft. (2002). Recuperado el 7 de Abril de 2013, de <http://www.brothersoft.com/astra-s-nesting-219401.html>

Materialise. (2012). Recuperado el 7 de Abril de 2013, de <http://software.materialise.com/magics-sintermodule>

Picornot. (2011). Recuperado el 7 de Abril de 2013, de <http://www.picornot.com/keyword/bin+packing+problem>

Fuentes Tabla 18 | Software de optimización de telas y lámina metálica

Hypertherm. (2013). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.hyperthermcam.com/products/pronest.php>

My Nesting. (2008). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.mynesting.com>

Nest Lib Online. (2012). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <https://www.nestlibonline.com/>

SigmaNest. (2013). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.sigmanest.com/en-us/index.aspx>

SolidServicios. (2013). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.solidservicios.com/productos/metacam/anidado/>

Fuentes Tabla 19 | Software comerciales optimización 3D

Cape Systems. (2012). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.capesystems.com/index.htm>

Esko. (2013). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.esko.com/en/Products/overview/artioscad/movies>

Fujitsu. (1995). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.fujitsu.com/downloads/TH/Inteload.pdf>

Load Planner. (2004). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de <http://www.loadplanner.com/>

Longen Solutions. (2013). Recuperado el 21 de Marzo de 2013, de http://www.logensolutions.com/VMS/CubeMaster/Cargo_Load_Plan_Optimization_Software_Overview.html

Fuentes Anexo 4 | Analogías directrices diseño para el ensamble

Alibaba. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de http://www.alibaba.com/product-gs/278490622/Beer_packaging_box.html

Dexiner. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://www.dexigner.com/news/20389>

DHhottdog Magazine. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://hdhottdog.wordpress.com/page/2/>

Direct Industry. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://www.directindustry.com/prod/nefab/paper-packaging-materials-15683-101181.html>

Direct Industry. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://news.directindustry.com/press/mp-packaging/mp-packaging-s-collapsible-pallet-boxes-optimized-for-use-in-racking-systems-65433-352464.html>

Food & Beverage Online. (2002). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://www.21food.com/products/plastic-sleeve-net-725453.html>

Greener Package. (2009). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de http://www.greenerpackage.com/folding_cartons/eco-friendly_folding_pharma_package_style_launched_interpack

Mitchel Lincoln. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de http://www.mitchellincoln.ca/Realisation-Moving_boxes-en-4.php

The Dieline. (2012). Recuperado el 13 de Mayo de 2012, de <http://www.thedieline.com/blog/2011/6/24/the-dieline-awards-2011-best-of-show-puma-clever-little-bag.html>

Well Promo. (2012). Recuperado el 2012 de 13 de Mayo, de http://www.wellpromo.com/Themes/Club_35.htm

7. Anexos

Anexo 1 | Base de datos de artículos de optimización de empaques

Anexo 2 | Base de datos patentes software de optimización de empaques

Anexo 3 | Base de datos artículos de diseño para el empaque

Anexo 4 | Analogías directrices diseño para el ensamble

Anexo 5 | Instructivos para ensayo de empaque