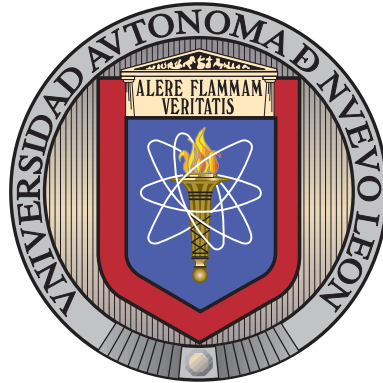


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DE EMPAQUETAMIENTO EN LA
CARGA DE CONTENEDORES

POR

GUADALUPE ESTEFANÍA PÉREZ DE LA O

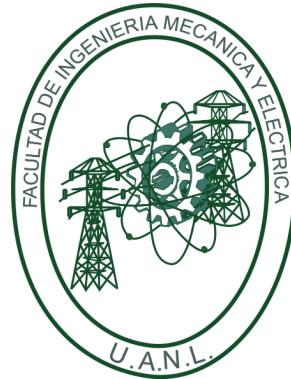
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

OCTUBRE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DE EMPAQUETAMIENTO EN LA
CARGA DE CONTENEDORES

POR

GUADALUPE ESTEFANÍA PÉREZ DE LA O

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

OCTUBRE 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Problema de Empaquetamiento en la carga de contenedores», realizada por el alumno Guadalupe Estefanía Pérez de la O, con número de matrícula 1985759, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa
Asesor

Dr. Luis Alfonso Infante Rivera
Revisor

Dr. Jose Daniel Mosquera Artamonov
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



067

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre 2020



*A mis abuelos, mi madre y dios.
Los amo con todo mi corazón, gracias.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	xI
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	5
1.2. Objetivo General	5
1.3. Justificación	6
1.4. Hipótesis	6
1.5. Estructura de la tesis	7
2. Antecedentes	8
2.1. La logística y el empaquetamiento	9
2.2. Estructura del problema de empaquetamiento	15
2.3. Análisis de los problemas de carga en contenedores	18
2.3.1. Restricciones relacionadas con los problemas de empaqueta- miento	21
2.4. Aplicaciones del problema de empaquetamiento	25

3. Formulación Matemática	27
3.1. Proceso de construcción del modelo	27
3.1.1. Modelo Base	28
3.1.2. Estructura del modelo base:	30
4. Metodología	33
4.1. Modelo de empaquetamiento	35
5. Experimentación computacional	42
5.1. Contenedor Rectangular	42
5.1.1. Malla Rectangular	42
5.1.2. Descripción del diseño de restricciones para el modelo	43
5.2. Experimentación	46
5.2.1. Generación del 1er. Escenario de Instancias	46
5.2.2. Equipo Computacional	46
5.2.3. Resultados	47
5.2.4. Generación del 2do. Escenario de Instancias	60
6. Resultados	65
6.1. Análisis del Primer Escenario de Instancias	65
6.2. Análisis del Segundo Escenario de Instancias	66
6.3. Trabajo futuro	68

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Cadena de suministro	2
2.1. Contenedor de carga 20'	10
2.2. Contenedor de carga 40'	10
2.3. Contenedor <i>Open Top</i>	11
2.4. Contenedor <i>Flat Bed</i>	11
2.5. Contenedor <i>Reefer</i>	12
2.6. Contenedor <i>Tank</i>	12
2.7. Contenedor <i>Open Side</i>	13
2.8. Contenedor <i>Flat Rack</i>	13
2.9. Contenedor <i>Granelero</i>	14
2.10. Estructura de empaquetamiento	15
2.11. Distribución de piezas dentro un contenedor	18
3.1. Representación de la malla que cubre el contenedor rectangular	28
3.2. Objetos sin asignación (a) y objetos con asignación (b).	30

3.3. Tipos de radios de los objetos cíclicos	31
3.4. Restricción de asignación	31
3.5. Restricción del borde del contenedor	32
3.6. Restricción de no traslape	32
4.1. Modelos de Investigación de Operaciones	34
4.2. Restricción asignación	38
4.3. Restricción de mínimos y máximos de objetos rectangulares dentro de un contenedor	38
4.4. Restricción de asignación de objetos	39
4.5. Restricción de la distancia de objetos con el borde del contenedor	39
4.6. Restricción	40
4.7. Restricción de capacidad	40
4.8. Restricción de equilibrio vertical en el eje z	41
4.9. Restricción de equilibrio horizontal en el eje x	41
5.1. Ejemplo de restricción de resistencia aplicado en un tipo de objeto	44
5.2. Representación de los objetos en sus 3 ejes	45
5.3. Resultado de la instancia B1	47
5.4. Resultado de la instancia B2	48
5.5. Resultado de la instancia B3	49
5.6. Resultado de la instancia R1a	50

5.7. Resultado de la instancia R1b	51
5.8. Resultado de la instancia R2a	52
5.9. Vista del contenedor por la parte superior	52
5.10. Resultado de la instancia R2b	53
5.11. Resultado de la instancia R3	54
5.12. Resultado de la instancia E1	55
5.13. Resultado de la instancia E2	56
5.14. Resultado de la instancia E3	57
5.15. Resultado de la instancia ER1	58
5.16. Resultado de la instancia ER2	59
5.17. Resultado de la instancia ER3	59
5.18. Volumen	62
5.19. Volumen + Resistencia	63
5.20. Volumen + Equilibrio	63
5.21. Volumen + Equilibrio + Resistencia	64

RESUMEN

Guadalupe Estefanía Pérez de la O.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: PROBLEMA DE EMPAQUETAMIENTO EN LA CARGA DE CONTENEDORES.

Número de páginas: 63.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo de esta investigación es minimizar los desperdicios del espacio utilizado dentro de un contenedor de dimensiones fijas, adaptando una formulación matemática considerando limitaciones reales en la práctica. Se desarrollo una metodología de investigación en la cual se reformulo un modelo entero lineal mixto, considerando restricciones tales como la capacidad que puede soportar el contenedor dado el número finito de objetos a ingresar, la restricción de equilibrio que representa la forma de colocar los objetos dado su peso y finalmente la restricción de resistencia, la cual explica cuanto puede soportar un objeto encima del otro sin dañar la carga.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: En esta investigación se trabajó con un modelo matemático explorando la posibilidad de modelar con restricciones relevantes

en la práctica. Es por ello, que existe una gran importancia para este tema; a partir del modelo inicial y considerando en los diferentes escenarios las restricciones más relevantes en la práctica actualmente, el sistema encontró soluciones factibles permitiendo minimizar el desperdicio de espacio del contenedor sin exceder la capacidad del mismo.

El tipo de objeto, la dimensión y complejidad han requerido del desarrollo de nuevos métodos de investigación de operaciones y de la creación de otras estrategias de solución para este problema. El análisis del modelo matemático permitirá crear una línea de investigación futura considerando otros tipos de restricciones y considerando este modelo como base para hacer un caso de estudio aplicado en una empresa.

Firma del asesor: _____



Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

AGRADECIMIENTOS

Primordialmente quiero agradecerle a dios que me guio para llegar y entrar al programa del CONACyT, estoy muy feliz por la oportunidad que me dieron de desarrollar una Maestría de alto nivel académico en la Facultad de ingeniería Mecánica y Eléctrica; apoyandome a lo largo de estos dos años con una beca para poder realizar mis estudios.

También a los profesores de la Universidad Autónoma de Nuevo León; quienes me apoyaron, aconsejaron y explicaron en cada proceso de mi investigación. A mi coordinadora de la maestría en cuestión, mi tutora quien estuvo apoyandome siempre que podía y a mis dos revisores quienes me ayudaron a entender el concepto del proyecto para cumplir con el desarrollo de este proyecto de investigación. A todos mis profesores, gracias por el tiempo, consejos y dedicación con resolver dudas de temas que no entendía, al desarrollar esta maestría aprendí conceptos, modelos, artículos, entre otros temas que me dejaron gratos recuerdos de esfuerzo y dedicación.

Finalmente, y no menos importante a mi familia por estar apoyándome desde lejos, motivandome, orando por mí y mandando mucha bendición en todo sentido de mi vida. Gracias a mi mamá y abuelos por creer en mí los amo, estoy infinitamente agradecida.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

”Dios, durante el desarrollo de esta maestría, he sentido que en los momentos que me he desvanecido y que he bajado la guardia tú te has hecho presente con pequeños detalles demostrándome que no todo es fácil en la vida pero que con fé y a tu lado todo es posible.”

¡Gracias!

Con el paso del tiempo los mercados se han tornado competitivos, la flexibilidad, la velocidad y la productividad hoy en día son claves que determinaran el nivel de exigencia de las organizaciones en el mercado; los requerimientos del cliente son cada vez más grandes, lo cual requiere que los procesos logísticos sean cada vez más precisos y claros para cumplir con los requerimientos del cliente.

Ante este panorama, la mejor forma de lograr una ventaja competitiva es crear relaciones con los clientes a través de una excelente calidad en el servicio y/o producto. Para cumplir con esa ventaja competitiva la organización debe considerar dos factores muy importantes, el primero es ser eficiente cuando se cumple con objetivos planificando el mínimo de sus recursos utilizados y eficaz cuando logra objetivos a corto plazo sin importar el costo de los recursos con la finalidad de concretar en tiempo y con calidad.

Considerando que el cumplimiento de los objetivos de una empresa derivan de ser planificados de manera eficiente y eficaz. Además de basarse en administrar

una cadena de suministro que este estrechamente vinculada con la logística, la cual según Handfield y Nichols Jr (1999), la cadena de suministro “Son todas aquellas actividades asociadas con el flujo y transformación de productos provenientes de materias primas o insumos dirigidos al consumidor final”. Una empresa también debe tener un flujo constante de información entre las diferentes etapas de sus procesos. En la figura 1.1 se muestra como la logística se integra en los procesos de cada área en una empresa englobando aquellas actividades asociadas con el movimiento de bienes desde el suministro de materias primas, la fabricación y la distribución; incluyendo la selección, compra, programación de producción, procesamiento de órdenes, control de inventarios, transportación, almacenamiento y servicio al cliente.

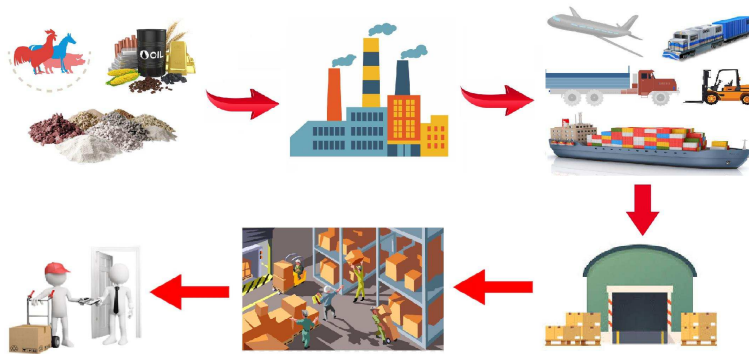


FIGURA 1.1: Cadena de suministro

Por lo tanto la logística, según la definición del *Council of Supply Chain Management Professionals* por sus siglas en inglés (CSCMP) “es parte de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo tanto eficiente como efectivo de bienes o servicios e información relacionada entre el punto de origen al de consumo con la finalidad de satisfacer los requerimientos del cliente”. Relacionar la logística y la administración de una cadena de suministro proporciona una estructura estable para la implementación de un correcto flujo de distribución entre todas las áreas en una empresa; identificando los factores o barreras que obstruyen la integración y la comunicación a lo largo de la cadena de suministro de manera que gestione estratégicamente los objetivos para minimizar todos los costos posibles en

el proceso.

Hoy en día el tema de la logística es una cuestión muy relevante para las empresas, ya que es un aspecto básico para conseguir beneficios, ser competitiva en el mercado y hacerlo de manera sostenible tanto para proveedores como para los clientes. Asimismo, de manera interna la definición de la logística en una empresa es la planificación, ejecución y control del flujo físico y de información interna de la organización, con el objetivo de optimizar los recursos, procesos y servicios al menor costo posible (Aguirre y Rodríguez, 2007). Cabe mencionar que en relación a una correcta planificación logística de una cadena de suministro, los principales problemas que se presentan son la rotación de inventarios, la distribución de mercancía, el daño de bienes, la planificación de carga, asertividad en los pronósticos, servicio al cliente, retraso en la producción, entre otros. Controlar tan solo uno de los problemas antes mencionados suele ser muy costoso y complicado para las empresas; la importancia de una adecuada planificación radica en disminuir los errores logísticos al máximo.

Especialmente las operaciones logísticas con respecto a la distribución de carga, tienen gran relevancia en la actualidad debido a los altos costos logísticos que causa la inadecuada planificación para cargar dentro un contenedor, la cual es protegida a lo largo de su distribución para alcanzar un alto grado de eficiencia con el objetivo de que la carga llegue segura a su destino final. Usualmente los orígenes del contenedor se remontan a la época de la Segunda Guerra Mundial, cuando un transportista norteamericano llamado Malcom McLean cansado de ineficiencias logísticas, inventa un soporte que terminaría revolucionando el transporte mundial; este hombre es el progenitor de la unidad que actualmente conocemos como contenedor y que, con la caída de los fletes marítimos, la construcción de enormes barcos portacontenedores, entre otros; ha extendido la utilización de contenedores para diferentes modos de transporte. La seguridad de la carga para su correcta distribución influye desde la forma de empaçado, su manipulación, así como las propiedades físicas únicas que, junto con los volúmenes o las cantidades normalmente aceptadas en los que se comercializa o traslada, determinan cómo y cuándo debe empaquetarse; por ejemplo, si se traslada carga a granel se debe colocar en barril o en cajas para una eficaz distribu-

ción; otro ejemplo es la carga paletizada, puede colocarse agrupada y ser trasladados en grúas, montacargas o camiones; también los cilindros de metal son un medio útil para envasar gases, entre muchas otras maneras dependiendo las características de la carga (Saipe, 2013).

Por otro lado las tecnologías de la información y comunicación (TIC) traen consigo una cantidad de impactos positivos en los procesos de carga, ya que influye sobremanera en las operaciones logísticas en tres maneras; primero gira alrededor de la gestión, después en la planificación y finalmente en como empaquetar dicha carga dentro de un contenedor (Fuentes y Parra, 2016). Cotidianamente las tecnologías de la información tienen mucha responsabilidad, que a menudo se comparte con toda el área operativa encargada de la planificación y distribución de la carga; algunos procesos tradicionales incluyen el uso de máquinas virtuales, actualización periódica del software, nuevas implementaciones del servidor físico, sincronización de pruebas, gestión de la seguridad, entre muchos otros.

Como en el resto de sectores productivos el uso de las TIC en las empresas de transporte y distribución habitualmente viene motivada por la reducción de costos. Esta búsqueda de eficiencia repercute directamente en el uso de este tipo de tecnologías que proporcionan herramientas para aprovechar al máximo la capacidad de la carga dentro de un contenedor, de disminuir los errores al planificar la distribución de la carga y coordinar mejor el trabajo logístico. Las exigencias de los clientes son cada vez mayores, se requiere una respuesta más rápida y eficaz de acuerdo a sus necesidades; la forma de planificar la distribución de la carga, puede considerarse en términos donde unidades pequeñas se coloquen dentro de una unidad un poco más grande, cuando el empaque del tamaño destinado al consumidor es muy sólido, los elementos de empaque más grandes requieren materiales de empaquetado menos fuertes porque los paquetes más pequeños son fuertes en sí mismos. De manera alternativa, cuando el paquete pequeño no es muy sólido (ejemplo, el empaquetado de bombillas), los elementos de embalaje más grandes requieren materiales de empaque muy resistentes y/o una disposición cuidadosa del producto más pequeño para minimizar el daño; tan solo según la secretaría de comunicaciones y transportes

menciona que más de 522 millones de toneladas se distribuyen al año en contenedores en México.

El empaquetamiento de productos en contenedores es una función logística fundamental para operar la cadena de suministro de manera eficiente. Ya que, como se dijo anteriormente tener niveles de bajo rendimiento logístico resulta en costos innecesarios; como la utilización adicional de contenedores para el traslado de la carga. La correcta distribución de la carga dentro contenedores es muy importante, estrechamente con el uso las tecnologías de la información y comunicación; para aprovechar la optimización del espacio, así como confirmar que la carga llegue sana a su destino final (Garey *et al.*, 1976).

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Muchas veces en las operaciones logísticas no se distribuye de manera correcta la carga y tampoco se aprovecha el espacio debidamente, lo que causa accidentes en carretera, lesiones a terceros, destrucción de la carga, entre otros; lo cual ocasiona altos costos logísticos en las operaciones de una empresa. Por lo anterior dicho, el problema que se presenta en este proyecto de investigación es que se tiene n cantidad de objetos rectangulares de diferente tamaño, con un ancho, profundidad y altura; para ser ingresados dentro de un contenedor de dimensiones fijas.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta investigación es utilizar el espacio posible dentro de un contenedor sin exceder la capacidad del mismo, distribuyendo la carga adecuadamente mediante la generación de una herramienta cuantitativa considerando restricciones prácticas de empaquetamiento.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La carga contenedorizada es importante para las empresas que buscan optimizar el espacio en los contenedores y el acomodo eficiente de la carga, sobre todo por el manejo de grandes sumas de dinero, que se generan. Actualmente tan solo el 95 % de los daños en la carga son causados por el empaquetamiento inadecuado y el 25 % son reclamaciones por daños físicos (LOADLOK, 2019).

Una de las causas que más contribuyen a los daños en contenedores de carga es sin duda la mala estiba, que causa el 20 % de las reclamaciones. Sus consecuencias están directamente relacionadas con los daños físicos y la pérdida de contenedores por una inadecuada distribución. En efecto el acomodo ineficiente de las cargas refiere a las incorrectas operaciones logísticas que van desde la distribución de peso y estabilidad hasta el posicionamiento, entre otras.

Es decir la distribución incorrecta de la carga puede traer consigo muchas variantes como son el desbalance de la carga que suele provocar daños muy graves, pérdida por completo de la carga, accidentes de terceros en carretera, entrega en tiempos desfasados, entre otras (Sutou y Dai, 2002). Distintas versiones de los problemas de carga de contenedores encontrados en la literatura, no tienen en cuenta ciertas restricciones que en efecto existen en la práctica.

1.4 HIPÓTESIS

El uso de herramientas de investigación de operaciones permitirá diseñar un modelo de programación lineal entera para maximizar el espacio utilizado dentro del contenedor al incluir restricciones para apegarse más a la realidad de acuerdo a las operaciones logísticas en las empresas; obteniendo resultados razonables.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

- Este trabajo inicia con el primer capítulo en el cual se presenta el objetivo de la investigación, se desarrolla la relación de la cadena de suministro con la planificación logística de las empresas con la finalidad de distribuir la carga adecuadamente dentro un contenedor.
- En el capítulo de antecedentes se abordan los fundamentos teóricos, así como diferentes enfoques del problema de empaquetamiento, las variaciones y aplicaciones.
- En el tercer capítulo se muestra el modelo base; se explica las restricciones desarrolladas por los autores y se da una explicación de la utilización de una malla rectangular para aproximar los objetos.
- En el siguiente capítulo se modifica el modelo base; se agregan nuevos parámetros y se agregan tres restricciones al modelo, se explica su implementación.
- En el quinto capítulo se explican las instancias utilizadas en la experimentación con el objetivo de mejorar la distribución de objetos rectangulares dentro de un contenedor de dimensiones fijas.
- Finalmente, en el siguiente capítulo se muestran los resultados de la experimentación y se da una pequeña conclusión de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

El misterio de la vida no es un problema a resolver, sino una realidad a experimentar, luchar por lograr tus metas consiguiendo lo que quieres.

David Levithan

En el proceso de carga de las mercancías dentro contenedores, se planifica la distribución de la carga para no dañarla al trasladar de un punto a otro. Asimismo en el proceso de distribución, las mercancías deben ser acomodadas de acuerdo con el plan de entrega y distribución; este problema es muy complejo debido a la gran cantidad de variables que interactúan, a esta situación se le conoce como problema de empaquetamiento.

Durante la revisión de la literatura se encontraron algunos factores del problema de cubicaje (empaquetamiento), usualmente este problema se presenta cuando no se ocupa la capacidad volumétrica (peso), debido a la inadecuada distribución de la carga en su interior. Desde la perspectiva de una organización, los enfoques de sistemas y de costos logístico requieren comprender todas las actividades de la cadena.

En este capítulo se determina el impacto sobre el uso inadecuado del transporte de carga, con base en el acomodo en contenedores intermodales con el propósito de originar el aprovechamiento de la capacidad del espacio. Para alcanzar dicho fin en el presente documento se identificaron distintas perspectivas por parte de autores,

contemplando procedimientos prácticos utilizados para analizar la colocación de la carga en contenedores respetando las normas vigentes de pesos y dimensiones así como no exceder la capacidad permitida en un contenedor; así como las variantes del problema de empaquetamiento, considerando un conjunto de restricciones que se presentan durante las operaciones y softwares utilizados.

2.1 LA LOGÍSTICA Y EL EMPAQUETAMIENTO

La gestión de una cadena de suministro tiene la finalidad de entregar el producto mediante el flujo de una red que distribuye la carga por procesos logísticos distintos en cada una de las áreas de la organización de una manera eficiente y sostenible para hacer llegar el producto al cliente final. Parte esencial en una cadena es el almacenamiento, la cual es utilizada para identificar las opciones de diseño y operación que ofrecen beneficios de la forma en que será resguardada la carga, las medidas de almacenamiento incluyen aspectos tales como la mano de obra, el costo, el tiempo, la administración y utilización; la recolección es otro factor de importancia que hace referencia a la compilación de artículos de acuerdo con los pedidos individuales de los clientes para formar paquetes y unidades de envío; finalmente, el elemento del transporte distribuye la mercancía desde el sitio de producción hasta la ubicación de almacenamiento y la ubicación de entrega para el cliente. Los modos de transporte (aire, agua, marítimo, ferrocarril o carretera) son clave para la distribución de la carga. Por su parte la importancia que tiene el traslado de mercancías es debido a las necesidades de los clientes, a responder con fiabilidad y flexibilidad mediante una coordinación integrada e integrada a través de varios modos, incluyendo todas las cuestiones normativas y reglamentarias.

Las principales modalidades de unitarización son la peletización y contenerización, la primera consiste en agrupar en una sola unidad la carga sobre la plataforma donde las estibas o paletas ayudan a manipularla, facilitando el transporte de la carga. Por su parte la contenerización es considerado como un recipiente de transporte que es resistente para facilitar el transporte de la carga por uno o varios medios de

transporte, para la distribución de la carga el transporte contenedorizado es la mejor forma de garantizar la entrega segura y rápida; existen muchos tipos de contenedores que van desde los más comunes, conocidos como “contenedores secos”, hasta los que son diseñados especialmente para una carga particular, como lo son (Pérez Cano, 2017):

- Contenedor convencional para carga seca de 20' y 40' (*Dry container*), es totalmente cerrado y estanco a las condiciones climáticas.

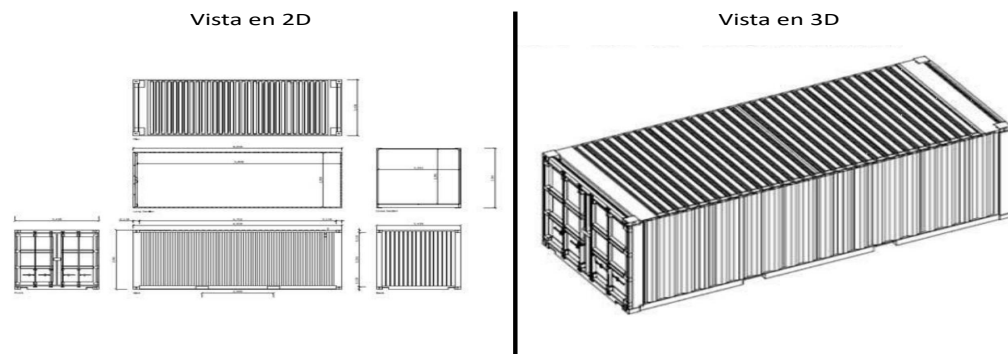


FIGURA 2.1: Contenedor de carga 20'

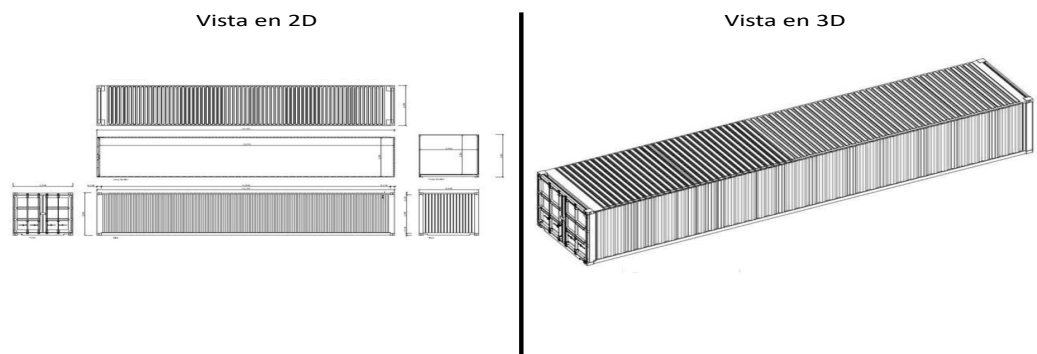


FIGURA 2.2: Contenedor de carga 40'

- Contenedor abierto arriba (*Open Top*), tienen el techo removible de lona, especialmente diseñados para transportar carga pesada o con dimension extra.

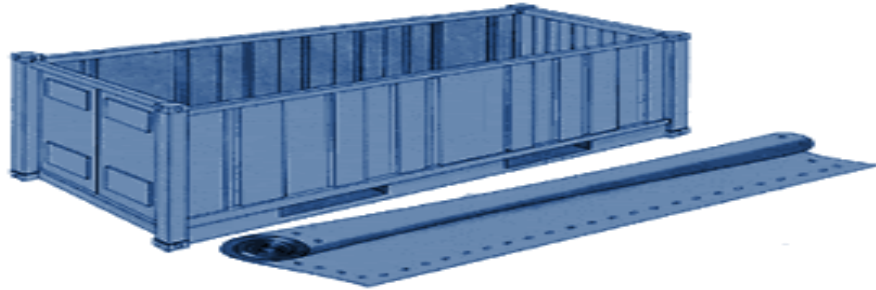


FIGURA 2.3: Contenedor *Open Top*

Fuente: Lim y Zhang (2005)

- Contenedor plataforma (*Flat Bed*), diseñados para el transporte de carga pesada y sobredimensional; la construcción de su fondo es fuerte y cuenta con dispositivos para la trinca de la carga.



FIGURA 2.4: Contenedor *Flat Bed*

Fuente: Hifi y M'hallah (2009)

- Contenedor refrigerado (*Reefer*), tienen su propio sistema de generación de frío y son diseñados para cargas que requieren temperaturas constantes o por

debajo del punto de congelación, el suministro de aire es controlado, sus paredes están recubiertas de espuma de poliuretano, cuenta con una unidad de refrigeración que asegura la temperatura.



FIGURA 2.5: Contenedor *Reefer*

Fuente: Dyckhoff (1990)

- Contenedor cisterna (*Tank*), este tipo de contenedor es destinado al transporte de productos líquidos, químicos, alimenticios, derivados del petróleo, etc.



FIGURA 2.6: Contenedor *Tank*

Fuente: Hifi y M'hallah (2009)

- Contenedor abierto por los costados (*Open side*), cuenta con puertas a los lados para permitir la manipulación de cargas largas.



FIGURA 2.7: Contenedor *Open Side*

Fuente: Pérez Cano (2017)

- Contenedor plataforma de testeros rígidos (*Flat Rack*), también son diseñados para el transporte de carga pesada y sobredimensional; la construcción de su fondo es fuerte, cuenta con dispositivos para la trunca de la carga y sus paredes en los extremos son para manejar cargas no convencionales.



FIGURA 2.8: Contenedor *Flat Rack*

Fuente: Bortfeldt y Wäscher (2013)

- Contenedor granelero, este contenedor en lugar de puertas, tiene una perforación arriba y los productos a granel se vierten dentro del contenedor.

FIGURA 2.9: Contenedor *Granelero*

Fuente: Fantoni (2003)

Fuentes y Parra (2016) nos mencionan algunas ventajas que hay por el uso de contenedores para el traslado de mercancía son:

Internacionalmente el contenedor cuenta con dimensiones estándar ISO y juega un papel importante en la distribución física de mercancías, ya que puede ser manipulado en cualquier parte del mundo. Además cuenta con una flexibilidad al transportar una amplia variedad de mercancías que van desde materias primas, productos manufacturados, productos congelados, automóviles, producto líquido o alimenticios perecederos en contenedores refrigerados, entre muchos más. La gestión (datos) del contenedor lleva un número de identificación único y un código que permite la gestión del transporte no en términos de cargas, sino en términos de unidad, permite una mejor planificación y ubicación de los contenedores permitiendo reducir los tiempos de espera considerablemente, además son asignados según la prioridad, el destino y las capacidades del transporte disponible. El empaque protege la mercancía al ser distribuida hasta el cliente final con la seguridad de que el contenedor solo puede abrirse desde el origen, en la aduana y en el destino, haciendo que los robos que existen de mercancía reduzcan considerablemente.

La función del empaquetamiento permite presentar la mercancía a su eventual comprador bajo un aspecto lo más atractivo posible y en un volumen lo más conveniente para la unidad de consumo, en relación con sus medios y sus costum-

bres, buscando disponer en el momento justo y al menor costo posible los bienes que son objeto de comercialización, destinado a contener un producto para su traslado, protegiéndolo de posibles alteraciones y permitiendo su comercialización:

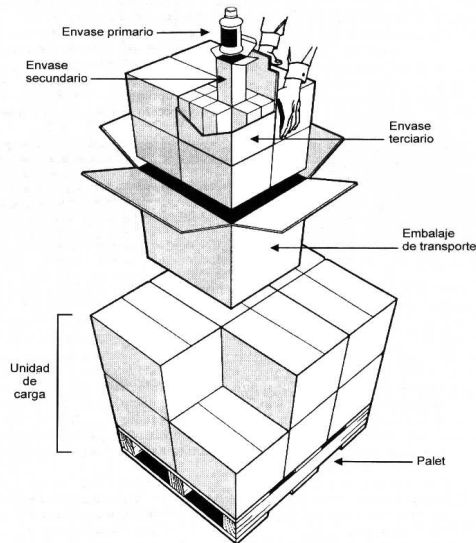


FIGURA 2.10: Estructura de empaquetamiento

Fuente: Fantoni (2003)

Por otro lado, el uso de pallets minimiza tiempo y movimientos, lo que reduce operaciones logísticas que resulta en ahorro de maniobras y con ello la toma de decisiones sobre el tipo de cubicaje a utilizar tanto para carga del mismo tipo así como cargas irregulares, lamentablemente muchas veces se suele desperdiciar espacio en el contenedor por el tamaño de los pallets; por tanto según varios autores los sistemas de cubicación son términos utilizados en las operaciones de carga, mejoran el rendimiento y mejora de los costos de las operaciones.

2.2 ESTRUCTURA DEL PROBLEMA DE EMPAQUETAMIENTO

El problema de empaquetamiento consiste en obtener diferentes elementos mediante la agrupación de todos o algunos de los objetos de forma que estos elementos

se asocian a todos o algunos de los objetivos sin violar las condiciones geométricas de forma que se optimice la función objetivo dada; de acuerdo a la estructura general del problema se clasifican de acuerdo a sus características Wäscher *et al.* (2007):

Dimensión:

- Se distingue por definir el problema en varias dimensiones.

Tipo de asignación de ítems y objetos:

- Maximización del output: Todos los objetos se utilizan y por lo tanto la selección se realiza sobre los ítems, lo que persigue maximizar el valor de la asignación.
- Minimización del íput: Se debe elegir entre un conjunto de objetos sobre los que se acomoden todos los ítems de forma que se minimicen las pérdidas.

Surtido de objetos grandes:

- Únicamente un objeto.
- Muchos objetos, todos iguales con sus dimensiones fijas.
- Objetos diferentes con dimensiones variables.

Surtido de objetos pequeños:

- Pocos ítems de diferentes dimensiones.
- Muchos ítems de muchas dimensiones.
- Todos los ítems de pocas dimensiones.
- Surtido de todos los ítems iguales.

Forma de los ítems pequeños, sólo para problemas de más de dos dimensiones:

- Forma regular.

- Forma irregular.

Sin embargo el autor Dyckhoff (1990) menciona otro tipo de clasificación dividida en cuatro características:

- Dimensión: La cual se distingue por dos, tres o hasta “n” dimensiones para definir el problema.
- Tipo de asignación: Asignación de todos los objetos o no se asignan todos.
- Variedad de Objetos: Objetos de forma diferente o con forma similar.
- Variedad de elementos: Forma y cantidad de los elementos, sean similares, muchos o pocos de forma diferente.

Esta otra perspectiva dada por el autor Santos Ramos (2017), menciona que existen dos categorías para clasificar los problemas de carga de contenedores de acuerdo a su objetivo:

- El primero de Minimización de valor de entrada, el cual considera problemas en los cuales se tienen suficientes contenedores y lo que se desea es minimizar el número de contenedores utilizados. Algunos problemas de ese tipo son, el *Single Stock Cutting Stock Problem*, *Multiple Stock-Size, Cutting Stock Problem*, *Residual Cutting Stock Problem*, *Multiple Bin-Size, Bin Packing Problem*, *Residual Bin Packing Problem* y *Open Dimension Problem*.
- En el segundo caso se denomina como maximización de valor de salida, solo un subconjunto de objetos pueden ser empacados ya que no se disponen de suficientes contenedores y lo que se desea es empacar el máximo valor posible del objeto. Los problemas relacionados para este caso son, *Identical Item Packing Problem*, *Single Large Object Placement Problem*, *Multiple Identical, Large Object Placement Problem*, *Multiple Heterogeneous, Single Knapsack Problem*, *Multiple Identical Knapsack Problem* y *Multiple Heterogeneous Knapsack Problem*.

El problema de empaquetamiento radica en la eficiente colocación de objetos en un contenedor de dimensiones fijas como ya se ha venido comentando, para cumplir con una determinada minimización del costo que le beneficie a la organización, este tema particularmente tiene un nivel muy complejo según la literatura analizada por la forma geometría de la carga, ya sea por figuras regulares como lo son en forma de círculo, cuadrado, rombo, entre otras formas, figuras irregulares o asimétricas que buscan ser ingresadas en el contenedor.

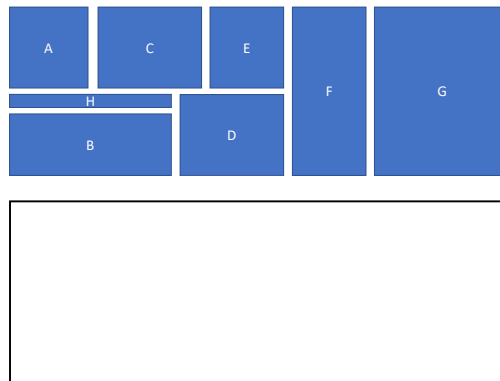


FIGURA 2.11: Distribución de piezas dentro un contenedor

Fuente: Elaboración propia

2.3 ANÁLISIS DE LOS PROBLEMAS DE CARGA EN CONTENEDORES

. Según Hifi y M'hallah (2009), mencionan que los problemas de empaquetamiento buscan distribuir y asignar los objetos con el objetivo de minimizar el área desperdiciada en un contenedor de dimensiones fijas. Existe una gran variedad de problemas de empaquetamiento que depende de la forma del contenedor y de los objetos que se van a empaquetar (López y Beasley, 2011):

- Empaquetado en cajas (*Bin Packing*):

- Este problema se basa en determinar el número mínimo de cajas que se necesitan para empaquetar un conjunto de ítems (objetos). El cual puede modelizarse bajo una o más dimensiones (Coffman Jr *et al.*, 1997).
- Problema de la mochila (*Knapsack Problem*):
 - Consiste en ingresar ítems con diferente tamaño en una mochila con una capacidad fija. El objetivo que se persigue es la obtención de un subconjunto de ítems de forma de lograr utilizar la máxima capacidad (White, 1992).
- Empaquetado Ortogonal (*Orthogonal Packing-Strip Packing*):
 - Este problema busca ubicar piezas rectangulares sobre otro rectángulo de ancho fijo y con una longitud variable. Este empaquetado se realiza con sus lados orientados siempre paralelos a los ejes “x” o “y” a 90° (Alvarez-Valdés *et al.*, 2008).
- Problema de anidación (*Nesting-Marker Making Problem*):
 - Babu y Babu (2001) menciona que el problema se basa en el corte de piezas irregulares bidimensionales sobre una hoja o bobina de material de manera que se minimicen las pérdidas de material debidas al corte.
- Problema de Corte (*Cutting Stock-Trim loss*):
 - Para este problema se requiere satisfacer las demandas de unas determinadas piezas que se deben obtener mediante el corte o partición de un objeto más grande disponible en stock en unas determinadas cantidades, minimizando los recortes residuales generados.

El problema de carga se utiliza para el empaquetado de piezas regulares tridimensionales o de cajas, de modo que éstas deben ubicarse en el interior de un contenedor maximizando el volumen usado por la carga, en la literatura los autores Karelahti (2002) y Pisinger (1997) mencionan las siguientes versiones para la carga en contenedores:

- Problema de empaque circular (CPP): Consiste en empaquetar o acomodar círculos como objetos o artículos dentro de un contenedor, optimizando todo el espacio posible. Este autor menciona que su objetivo es empaquetar n número de círculos diferentes de radio conocido, utilizando un algoritmo de búsqueda que combine la distancia de posición local y la estrategia de búsqueda dicotómica (subdivisión del área de un objeto en dos) (Akeb *et al.*, 2009).
- Problema de empaque del círculo recursivo (RCP): Consiste en problemas de empaquetamiento donde los círculos pueden ser colocados ya sea dentro de otros círculos o fuera de ellos en donde todo este empaquetado en un contenedor rectangular. Se analizó un artículo en el cual se trata de empaquetar tubos en un contenedor, antes de ser insertados en el recipiente, los tubos se colocan dentro de otros de forma recursiva, proponen un modelo para minimizar el número de contenedores y para maximizar el valor de la carga por medio de una heurística que hace que cualquier tubo sea colocado en el interior por otros más delgados disponibles para finalmente ser ingresados en el contenedor (Pedroso *et al.*, 2016).
- Problema de dimensión abierta (ODP): Empaquetar un conjunto de carga en un solo contenedor con una o más dimensiones variables de manera que se minimice el volumen del contenedor. En este artículo se proponen tres heurísticas primero propone un procedimiento de solución de generación de franja abierta que utiliza una regla referida como posición local en franja abierta y en segundo lugar propone una versión simple de la primera heurística mediante la aplicación de una estrategia de orden de cambio, la última es una heurística híbrida que combina la búsqueda de una serie de valores objetivo (Akeb *et al.*, 2009).
- Problema de embalaje individual Bin-Bin (SBSBPP): Embalaje de un conjunto de carga heterogénea de envases idénticos. En el artículo se desarrolla un algoritmo de empaque que combina un algoritmo heurístico con el algoritmo

mo Best Fit para resolver este problema, realiza el análisis de los resultados basando su investigación en aplicaciones reales (Garey y Johnson, 1981).

- Problema de embalaje por el tamaño (MBSBPP): Embalaje de un conjunto fuertemente heterogéneo de la carga en surtido de recipientes utilizados reducidos al mínimo. En este proyecto se realiza una formulación de programación entera y se describen los resultados obtenidos de la aplicación de un procedimiento heurístico (Wilson, 1965).
- Problema de dimensión (PAO): Embalaje de un conjunto de carga en un solo recipiente con una o más dimensiones variables de tal manera que el volumen del recipiente se minimice. El artículo en cuestión menciona la importancia de las dimensiones de una pieza a través de su longitud, presión del empaque, la metodología que usan son basados en modelos estadísticos que al final muestran resultados positivos con algoritmos genéticos y un estudio de caso (Chen *et al.*, 2011).

2.3.1 RESTRICCIONES RELACIONADAS CON LOS PROBLEMAS DE EMPAQUETAMIENTO

En este apartado se presentan las restricciones las cuales son muy relevantes en la carga de contenedores, las restricciones básicas y comunes en todos los problemas de este tipo son dados en los objetos empaquetados situados completamente dentro del contenedor, cada tipo de objeto a introducir en el contenedor con la orientación permitida que soporte un tamaño de carga determinada, encima suyo, otro aspecto a tomar en cuenta es la orientación de cada caja debido a que el contenido que se va a transportar sea frágil, hay otros tipos de restricciones para los problemas de carga de contenedor entre las cuales están (Bortfeldt y Wäscher, 2013):

1. Restricciones relacionadas con la carga de contenedores.

- a. Restricción con el límite de peso en el contenedor, la cual explica que por lo general solo se pueden cargar artículos pequeños siempre y cuando no se exceda un cierto límite de peso. El objetivo de esta restricción según los autores es minimizar la distancia total del recorrido y del conjunto de patrones de carga, con respecto al espacio dentro del contenedor y a la capacidad de carga. Los límites de peso se pueden modelar de manera directa como restricciones de mochila lineal, donde la suma de los pesos de los artículos cargados debe ser menor o igual al límite del peso impuesto por el contenedor.
 - b. Restricción de distribución del peso, la cual tiene que ver con el equilibrio de toda la carga, requieren que el peso de la carga se distribuya de manera uniforme en el contenedor para reducir el riesgo de que la carga se desplace cuando se transporte de un lugar a otro. El objetivo en este es introducir un modelo de optimización de entero mixto lineal para dar una solución.
2. Restricción relacionada con los artículos.
- a. Prioridad de la carga, aborda problemas de carga dado que el espacio del contenedor no es suficiente para acomodar los artículos pequeños; El objetivo es maximizar las salidas (valor). No se debe enviar ningún artículo de prioridad baja si se requiere que un artículo de una prioridad más alta se quede atrás.
 - b. Por tipo de Orientación de cada una de las cajas debe ser definida y esta será ortogonal a las paredes del contenedor. Cada caja tiene seis distintas direcciones y deben ser asignados de manera tal que el aprovechamiento del espacio sea máximo. Para estudiar el problema con menor complejidad pueden ser restringido. Cuando la capacidad del contenedor es ocupada por completo, es necesario decidir qué productos tienen prioridad y cuáles no. De esta manera se priorizan lo que sean perecederos o los que con mayor urgencia necesite el cliente.
 - c. Por el apilamiento de la carga, restringen la forma en que las cajas se pueden colocar encima de la otra. Esto surge por la limitada resistencia de la carga

del peso o presión que puede ser soportada. Su objetivo es introducir la carga sin evitar dañarla, protegiéndola con el tipo de empaque utilizado.

3. Restricción relacionada con la carga.

- a. Restricción de envío completo, para este tipo de problemas de maximizar la salida, se requiere que la carga se acomode de la mejor manera posible, pero dado que no hay suficiente espacio disponible en el contenedor, algunos artículos inevitablemente deben quedar atrás.

Si se carga un elemento de un subconjunto, todos los demás elementos de ese subconjunto también deben cargarse. Si no se puede cargar un elemento, no se cargará ningún elemento del subconjunto. Por ejemplo cuando partes de un mueble se embalan por separado y deben ensamblarse en el sitio del cliente. En tal caso, generalmente no se permiten envíos incompletos (Bischoff y Ratcliff, 1995).

- b. Restricción de asignación, surgen en problemas de carga de contenedores múltiples. Por ejemplo, cuando deben enviarse al mismo destino o cuando van a un cliente quien quiere recibir todos los artículos pedidos como un envío único y no como un envío en partes. Por otro lado, pueden existir restricciones de asignación que exigen que ciertos artículos o clases de artículos no se carguen en el mismo contenedor (Liu *et al.*, 2011).

4. Restricción relacionada con el posicionamiento.

- a. La restricción de posicionamiento restringe la ubicación de los artículos dentro del contenedor, ya sea en términos absolutos (es decir, dónde se ubicarán o no los artículos dentro del contenedor) o en términos relativos (es decir, dónde se ubicarán o no los artículos en relación el uno al otro). Dicha restricción suele estar impuesta por el tamaño, el peso o el contenido de un artículo. Por ejemplo, los artículos voluminosos solo se pueden cargar o descargar si se encuentran al lado de la puerta de un contenedor (Haessler y Talbot, 1990).

5. Restricción relacionada con la carga.

- a. Restricciones de estabilidad, las cargas inestables pueden provocar daños en la carga e incluso lesiones al personal durante el transporte o las operaciones de carga y descarga. Los autores argumentan que la estabilidad de la carga se convierte en una consecuencia inmediata de la compacidad de carga correspondiente cuando se puede garantizar una alta utilización del espacio del contenedor (Pisinger, 2002; Bortfeldt y Wäscher, 2013; Parreño *et al.*, 2010).

Con respecto a la estabilidad de la carga, se puede distinguir entre estabilidad vertical y horizontal. Por una parte la estabilidad vertical o también conocida como estabilidad estática (de Castro Silva *et al.*, 2003) evita que los artículos caigan al piso del contenedor o encima de otros artículos.

La estabilidad horizontal o llamada estabilidad dinámica asegura que los artículos no pueden moverse significativamente mientras se mueve el contenedor (Bischoff y Ratcliff, 1995) considerando que los artículos puedan resistir otro peso por encima. Se puede considerar que la estabilidad horizontal completa está asegurada si cada artículo empaquetado es (horizontalmente) adyacente a otro artículo o en otro caso a junto a una pared del contenedor.

- b. Restricciones de complejidad, los patrones de carga complejos, por una parte pueden ser no aceptables para la carga manual de contenedores porque los patrones no siempre pueden visualizarse de manera que el personal de carga entienda correctamente. Por otro lado, las tecnologías mecánicas y de embalaje no siempre son las adecuadas y pueden resultar costosas, reflejando limitaciones de recursos tecnológicos y mano de obra.

2.4 APLICACIONES DEL PROBLEMA DE EMPAQUETAMIENTO

En esta sección se hace referencia a la aplicación de modelos matemáticos y restricciones para los problemas de empaquetamiento de investigaciones desarrolladas por algunos autores.

Olsson *et al.* (2020), realizó una investigación basada en un caso práctico de automatización para la planificación de carga de contenedores en el centro de distribución Atlas Copco, en algunos casos los paquetes se envían en contenedores marítimos y para planear la carga toman en cuenta diversos factores entre los cuales están: la heterogeneidad de los paquetes teniendo en cuenta el tamaño, el peso, la capacidad de apilamiento, el posicionamiento y la orientación.

Mosquera Artamonov (2016), por su parte este autor realizó una investigación del efecto en el empaquetamiento rectangular utilizando parámetros de control de diferentes tipos de objetos y dos familias de desigualdades válidas, usando métodos de solución exacta. El autor López y Beasley (2011) realizó un proyecto en la empresa portuguesa Spiralpack – Manipulados de papel, S.A., se utiliza un modelo de programación entera considerando una función objetivo para minimizar el área total ocupada en el contenedor o el volumen total ocupado por los palets, se realizó el desarrollo de un modelo basado en la restricción de posicionamiento. También se optó por proponer un heurístico dividido en dos algoritmos, en el primero se realiza una consolidación vertical, el cual distribuya las nuevas paletas consolidadas en el contenedor y el segundo algoritmo para el equilibrio de la carga en ambos lados del contenedor (en términos del peso de los palets). Correcher *et al.* (2017) realizó un proyecto en la empresa Renault, donde se buscaba minimizar la cantidad de vehículos utilizados para enviar los artículos en contenedores, utilizando restricciones geométricas y desarrollando un algoritmo GRASP.

Costa y Captivo (2016) realizaron una investigación en una empresa portuguesa, la cual busca planificar el empaquetamiento de un conjunto de cajas en un

solo camión, utilizando restricciones como la estabilidad de carga, restricciones de orientación de la caja, límite de peso del camión y la distribución uniforme del peso dentro del camión. Los autores proponen la elaboración de una heurística basada en un enfoque de disposición de capas que comprende una estrategia de selección de esquina para colocar los cuadros. Grason (2015) utilizan un modelo de empaquetamiento para la generación de supercapacitadores dado la necesidad de satisfacer la creciente demanda de contenedores de alta potencia en dispositivos renovables que tienen límite de uso en comparación con las baterías tradicionales, tomando en cuenta estos parámetros: La distribución, el tamaño y el volumen del producto. (Litvinchev y Ozuna, 2014) Los autores basan su investigación en el empaquetamiento de objetos circulares con superficies o lados curvos para minimizar el desperdicio del espacio en el contenedor, se utiliza un modelo de programación.

Para concluir debo mencionar que el tema que estoy desarrollando tiene una infinidad de ramas de investigación y se me hace fascinante toda la gama de variaciones que encuentre en la literatura, desde restricciones, métodos de solución, entre otros. Cada autor menciona una estructura diferente con soluciones variadas que se relacionan entre sí para llegar a un solo punto. Satisfacer los requerimientos del cliente y de vital importancia proteger la mercancía. Al investigar y analizar el desarrollo de los trabajos de los autores antes descritos, aplicaré y compararé lo antes citado para describir los pasos de la metodología en general para posteriormente definir la técnica de solución que implementaré en la elaboración de esta tesis.

CAPÍTULO 3

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La felicidad humana generalmente no se logra con grandes golpes de suerte, que pueden ocurrir pocas veces, sino con pequeñas que ocurren todos los días.

Benjamin Franklin

En este capítulo se aborda el modelo matemático base de esta investigación, se explica la estructura del modelo, así como las características.

3.1 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Para construir el modelo matemático del problema de empaquetamiento, se continúa con la formulación expuesta por Litvinchev y Ozuna (2014). Se agrega la modelación base y posteriormente se agregan restricciones apegadas a la realidad respecto (Bortfeldt y Wäscher, 2013) para la definición del problema de esta investigación, así como el procedimiento implementado.

3.1.1 MODELO BASE

Este modelo es el resultado de aplicar la variante del problema de empaquetamiento de círculos aproximados por medio de una malla en un contenedor rectangular. La idea de utilizar una malla se implementó en los problemas de corte por primera vez (Beasley, 1985) y recientemente (Galiev y Lisafina, 2013) en los problemas de empaquetamiento.

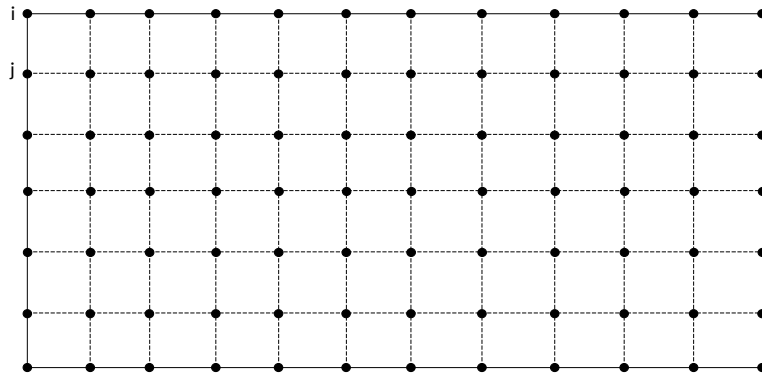


FIGURA 3.1: Representación de la malla que cubre el contenedor rectangular

Supuestos del modelo

- Los objetos círculos no son idénticos.
- Se conoce el radio de los objetos circulares.
- Existe un número finito de objetos.
- Se conoce la capacidad del contenedor.
- Los objetos no son fraccionables.

- No puede haber traslape entre estos objetos.
- Los objetos son compatibles (se pueden transportar juntos).

Conjuntos:

I: El conjunto de puntos, $i \in I$.

K: El conjunto de radios, $k \in K$.

F: El conjunto de puntos en la frontera, $f \in F$.

Parámetros: sean,

m_k : Mínimo de círculos a empaquetar.

M_k : Máximo de círculos a empaquetar.

r_k : Radio del objeto $k \in K$.

d_{ij} : Distancia del punto i al punto j .

N_{ik} : Cantidad de puntos totales en la malla ($j, l: \neq j, d_{ij} \leq R_k, R_l$).

Variables:

La utilización de la malla cubre la totalidad del contenedor rectangular, haciendo que los puntos de la malla se conviertan en posibles asignaciones en el centro de cada círculo. La variable se considera binaria al tener un valor entre 0 a 1, representada de la siguiente manera:

x_i^k : Indica si en el punto x_i se coloca el objeto de dimensiones k .

x_j^l : Indica si en el punto x_j se coloca el objeto de dimensiones l .

3.1.2 ESTRUCTURA DEL MODELO BASE:

$$\text{Maximizar } \pi \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} R_k^2 x_i^k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$m_k \leq \sum_{i \in I} x_i^k \leq M_k, \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_i^k \leq 1, \quad i \in I/F \quad (3)$$

$$R_k x_i^k \leq \min_{j \in F} d_{ij}, \quad i \in I, \quad k \in K \quad (4)$$

$$x_i^k + x_j^l \leq 1, \quad \forall i \in I, \quad k \in K, \quad (j, l) \in N_{ik} \quad (5)$$

$$x_i^k \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad k \in K \quad (6)$$

Dónde:

El (1) es la función objetivo que maximiza el área cubierta por el objeto k circular, en algún punto i de la malla dentro el contenedor rectangular.

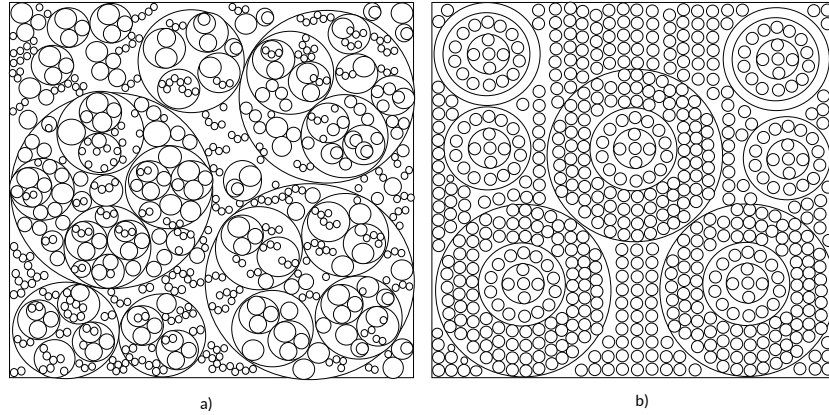


FIGURA 3.2: Objetos sin asignación (a) y objetos con asignación (b).

El (2) permite que haya un número mínimo y máximo de objetos circulares dentro el contenedor.

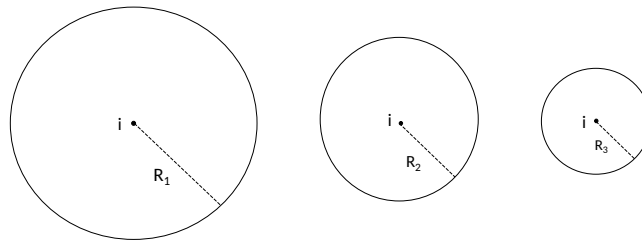


FIGURA 3.3: Tipos de radios de los objetos circulares

El siguiente (3) asegura que sólo se puede poner un objeto en un punto de la malla a lo máximo.

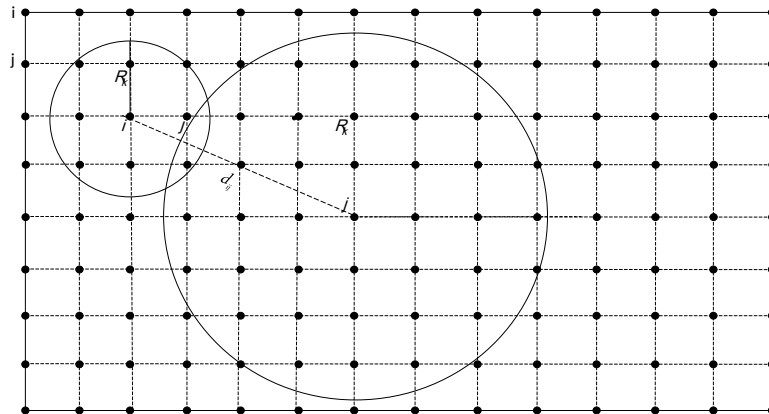


FIGURA 3.4: Restricción de asignación

Por otra parte la (4) refiere a que en el punto i de la malla no será centro de un objeto circular si la distancia de i a la frontera del contenedor rectangular es menor que el radio del objeto circular R_k .



FIGURA 3.5: Restricción del borde del contenedor

La restricción (5) asegura que no debe haber traslape entre los objetos circulares ni superposición dentro el contenedor rectangular.

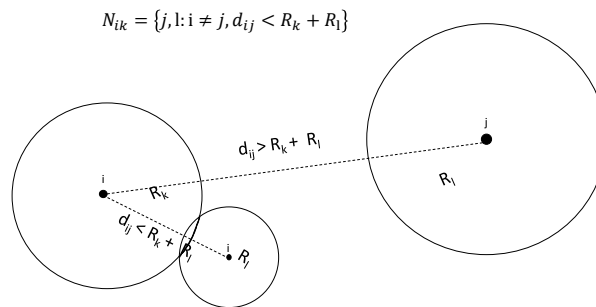


FIGURA 3.6: Restricción de no traslape

Finalmente la (6) representa las variables de lógicas o de estado.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

La educación no es preparación para la vida; la educación es la vida en sí misma y la buena suerte no es casual, es producto del trabajo.

John Dewey/Emily Dickinson

En el presente capítulo se desarrolla el modelo matemático utilizado en este proyecto de investigación, el cual tiene como finalidad dar una posible solución al problema de empaquetamiento desarrollando un procedimiento con ayuda de herramientas de investigación de operaciones así como el uso de softwares para su implementación. El enfoque de este problema, consiste en examinar por completo el área del contenedor para ubicar los objetos, tomando en cuenta restricciones tales como el equilibrio de los objetos; la resistencia del objeto y la capacidad del contenedor.

El modelo matemático es útil para la toma de decisiones en una empresa, diseñando resultados en tiempo computacional razonable; acoplándose a la situación real del problema. La mayor parte de los modelos analizados en literatura son prescriptivos o de optimización; para un modelo descriptivo se encuentran los siguientes elementos:

- Función objetivo.

- Variables de decisión.
- Restricciones.

Por su parte, un modelo de optimización localiza variables de decisión, que maximicen o minimicen la función objetivo que debe satisfacer las restricciones del problema. Las variables de decisión están bajo el control del valor que será representado en el modelo matemático. Finalmente, las restricciones sólo son posibles con ciertos valores dadas las variables de decisión (Winston y Goldberg, 2005).

En el análisis realizado se encontró que existe una clasificación de modelos, entre los cuales están los determinísticos, híbridos y estocásticos como se muestra en la siguiente imagen:

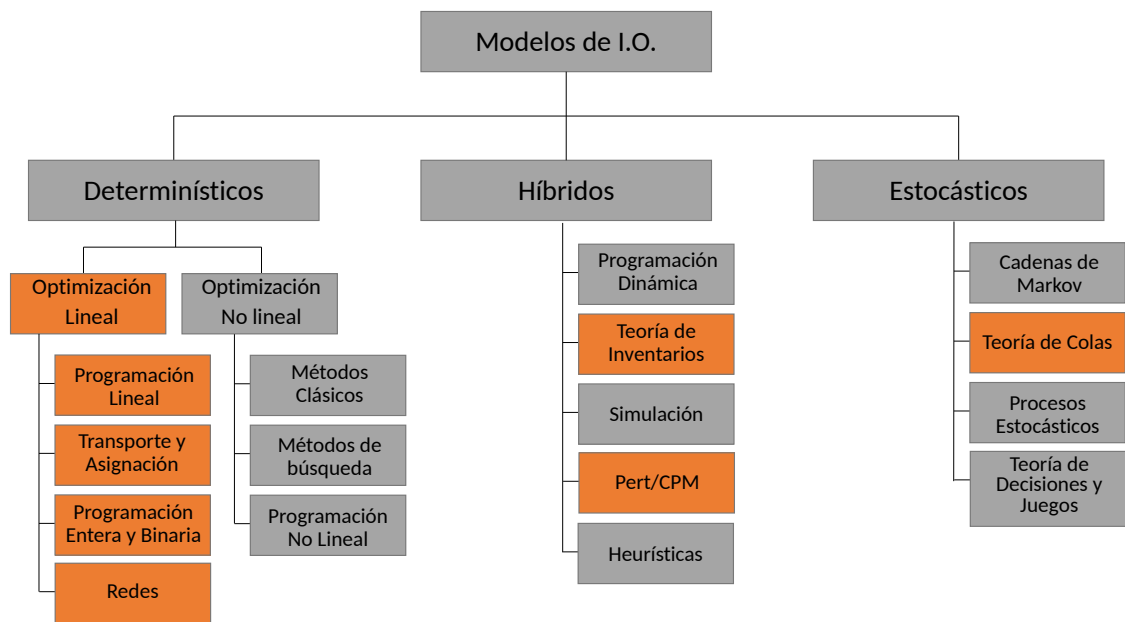


FIGURA 4.1: Modelos de Investigación de Operaciones

4.1 MODELO DE EMPAQUETAMIENTO

A continuación se presenta el modelo matemático de programación entera desarrollado en este trabajo de investigación, iniciando con la definición de los conjuntos así como parámetros del modelo matemático. Posteriormente se define la variable de decisión utilizada, la función objetivo que se pretende alcanzar y finalmente las restricciones consideradas en el modelo de esta investigación.

Supuestos del modelo

- Los tipos de objetos no son idénticos.
- Se conoce el volumen de los objetos.
- Se conoce la capacidad del contenedor.
- Los objetos tienen un peso definido.
- Los objetos son compatibles (se pueden transportar juntos).
- La carga es a granel.

Conjuntos:

I: El conjunto de puntos en la malla, $i \in I$.

K: El conjunto de tipos de objetos, $k \in K$.

F: Puntos (nodos) i que tienen conflicto con la frontera (borde) del contenedor

$I \in F$.

Parámetros: sean,

Q: Capacidad del contenedor.

MI: El conjunto de puntos en la mitad inferior del contenedor.

MS: El conjunto de puntos en la mitad superior del contenedor.

ZM: El conjunto de puntos en la zona media del contenedor.

ZI: El conjunto de puntos de la malla debajo la línea media zona izquierda del contenedor.

ZD: Zona derecha del contenedor.

w_k : Peso del tipo de objeto $k \in K$.

m_k : Número mínimo de objetos a empaquetar $k \in K$.

M_k : Número máximo de objetos a empaquetar $k \in K$.

V_k : Volumen del tipo objeto $k \in K$.

R_k : Resistencia del tipo objeto $k \in K$.

d_{ij} : Distancia del punto i al punto j .

T_{ik} : Tipo de objeto k que esta encima de él en algún punto i de la malla.

Variables:

La utilización de la malla cubre la totalidad del contenedor rectangular, haciendo que los puntos de la malla se conviertan en posibles asignaciones en el centro de cada círculo. La variable se considera binaria al tener un valor entre 0 a 1, representada de la siguiente manera:

x_i^k : Indica si en el punto x_i se coloca el objeto de dimensiones k .

x_j^l : Indica si en el punto x_j se coloca el objeto de dimensiones l .

Estructura del modelo base:

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} V_k x_i^k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$m_k \leq \sum_{i \in I} x_i^k \leq M_k, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_i^k \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$x_i^k = 0, \quad \forall (i, k) \in F \quad (4)$$

$$x_i^k + x_j^l \leq 1, \quad \forall (i, k, j, l) \in N \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} w_k x_i^k \leq Q, \quad i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{i \in MI} \sum_{k \in MI} w_k x_i^k \geq \sum_{i \in MS} \sum_{k \in MS} w_k x_i^k + e, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in ZI} \sum_{k \in ZI} w_k x_i^k + e \leq \sum_{i \in ZM} \sum_{k \in ZM} w_k x_i^k, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in ZD} \sum_{k \in ZD} w_k x_i^k + e \leq \sum_{i \in ZM} \sum_{k \in ZM} w_k x_i^k, \quad (9)$$

$$\sum_{j, l \in T_i^k} w_l x_j^l \leq R_k + M(1 - x_i^k), \quad \forall i, k, \quad (10)$$

$$x_i^k \in \{0, 1\}, \quad i \in I, k \in K \quad (11)$$

Dónde:

El (1) es la función objetivo que maximiza el área cubierta por el tipo de objeto k dentro el contenedor rectangular en algún punto i de la malla.

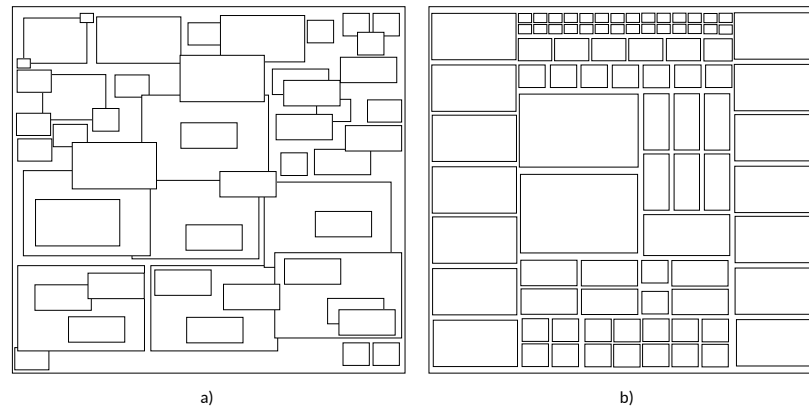


FIGURA 4.2: Restricción asignación

La restricción (2) admite un número mínimo y máximo de objetos dentro el contenedor.

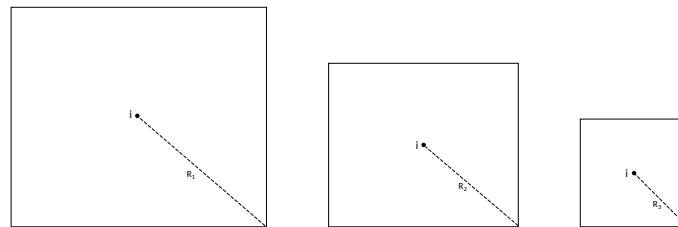


FIGURA 4.3: Restricción de mínimos y máximos de objetos rectangulares dentro de un contenedor

Por consiguiente la (3) asegura que en el punto i de la malla sólo se podrá colocar un objeto a lo máximo.

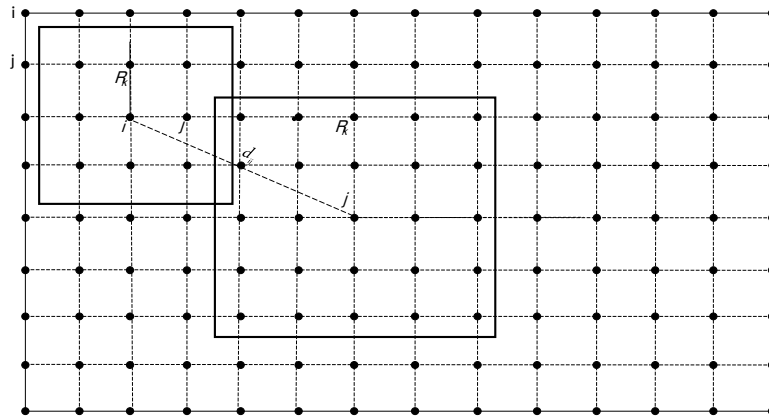


FIGURA 4.4: Restricción de asignación de objetos

En la (4) refiere a que no se coloque un objeto que se salga de la frontera del contenedor.

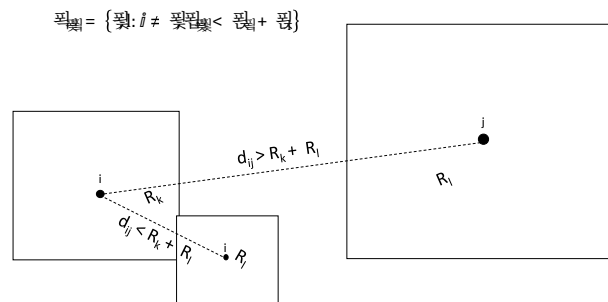


FIGURA 4.5: Restricción de la distancia de objetos con el borde del contenedor

La restricción (5) revisa si dos objetos colocados respectivamente en punto i y j con tipos k y l que están en el conjunto N (pareja de puntos que se solapan). Si llegaran a pertenecer evitaría que se coloquen ambos a la vez.

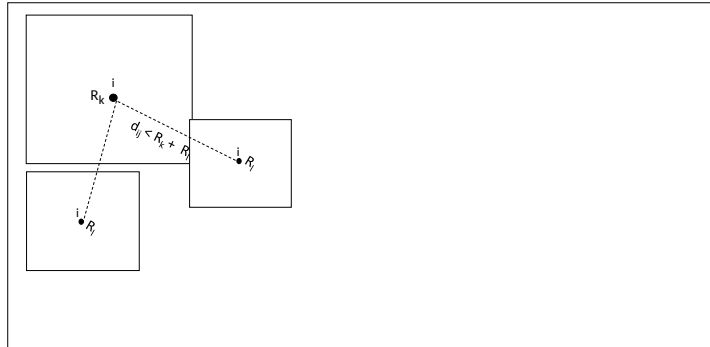


FIGURA 4.6: Restricción

La (6) asegura que la suma del peso de los objetos colocados dentro el contenedor no supere la capacidad del mismo.

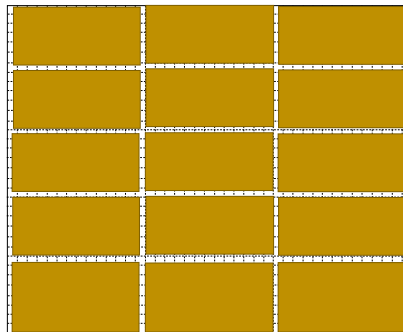


FIGURA 4.7: Restricción de capacidad

(7) Asegura que la suma del peso de los objetos colocados en la mitad inferior dentro del contenedor sea mayor que la mitad superior.

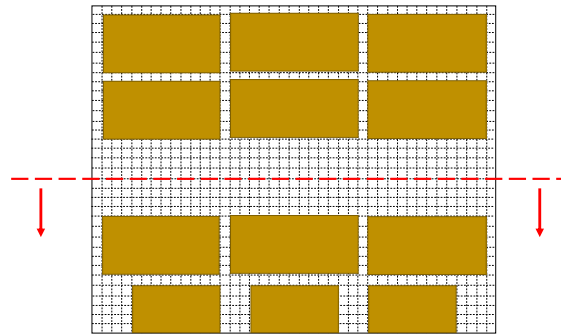


FIGURA 4.8: Restricción de equilibrio vertical en el eje z

Asegura que la suma del peso de los objetos colocados en la zona media dentro del contenedor sea mayor que la zona izquierda y derecha (8) y (9).

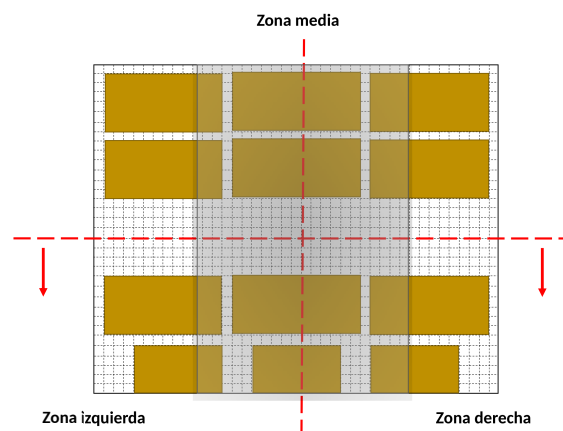


FIGURA 4.9: Restricción de equilibrio horizontal en el eje x

La restricción (10) asegura que la resistencia de los objetos colocados en algún punto del contenedor, soporte el peso de los objetos colocados arriba de ellos.

Finalmente, la (11) representa las variables lógicas o de estado.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

La vida no es un problema a ser resuelto, es una realidad a experimentar, no arriesgarse es perderse a uno mismo.

Soren Kierkegaard

En el presente capítulo se muestra la generación de la malla en un contenedor rectangular de dimensiones fijas; para ser utilizado en la experimentación de esta investigación.

5.1 CONTENEDOR RECTANGULAR

En las operaciones logísticas de una empresa son utilizados contenedores rectangulares; en esta investigación se discretiza dicho contenedor basandose en las coordenadas x , y , z ; cubriendolo con una malla, la cual es representada por puntos. Donde cada punto de la malla significa una posible asignación de un tipo de objeto rectangular en algún punto dentro el contenedor, el punto puede ser considerado el centro de la masa del tipo de objeto o algún otro.

5.1.1 MALLA RECTANGULAR

Una vez diseñada la malla se define el conjunto N según sea el caso de empaquetamiento para luego construir el modelo matemático en el que la variable binaria

x_i^k se relacione a uno de los puntos i de la malla.

El empaquetamiento de objetos rectangulares en tres dimensiones no implica ninguna modificación en la estructura del modelo base (Litvinchev y Ozuna, 2014); para este trabajo se definió la condición en que los objetos rectangulares no se traslapen. Para lograr esto, se definió el conjunto N por sus radios x, y, z ; representada por la siguiente fórmula:

$$N = ((i, k), (j, l)), |x_i - x_j| < rx_k + rx_l, |y_i - y_j| < ry_k + ry_l, |z_i - z_j| < rz_k + rz_l$$

El conjunto N implica entonces tres condiciones a cumplir:

$$|x_i - x_j| < rx_k + rx_l \quad |y_i - y_j| < ry_k + ry_l \quad |z_i - z_j| < rz_k + rz_l$$

En el modelo matemático la modelación de la malla fue en tres dimensiones definido por puntos en los ejes x, y, z del contenedor; el diseño de una malla más densa cobra aún más importancia en este tipo de empaquetamientos.

5.1.2 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE RESTRICCIONES PARA EL MODELO

El empaquetamiento resultante es un empaquetamiento libre, donde no necesariamente se sigue un patrón por malla en los ejes x, y . Al igual que en el modelo de dos dimensiones se pueden considerar restricciones de equilibrio y resistencia. En el caso de empaquetamientos en tres dimensiones, para establecer la condición de que objetos están encima otro deberá considerarse el área superior del objeto para detectar que tipo de objetos están por encima de él; la siguiente norma define dicha resistencia.

$$Si: |\dot{y}_i - \dot{y}_j| < (ry_k + ry_l) \quad y \quad |\dot{x}_i - \dot{x}_j| < (rx_k + rx_l) \quad y \quad z_j > z_i + rz_k \quad entonces \\ j, l \in T_{ik}$$

Se define un conjunto T_{ik} para cada punto i y tipo de objeto k por lo que el conjunto T contendría los otros tipos.

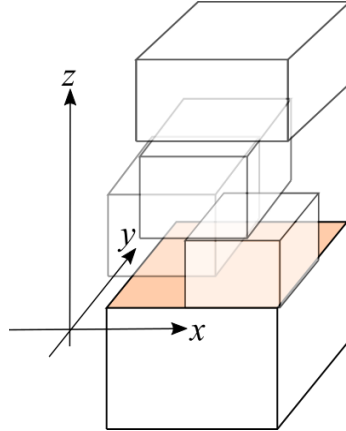


FIGURA 5.1: Ejemplo de restricción de resistencia aplicado en un tipo de objeto

La restricción de resistencia necesitara la altura del cuboide que es el radio en z del tipo de objeto rz_j dos veces, la densidad de los objetos y su radio son definidos por su tipo k en el modelo, entonces ésta restricción puede quedar especificada como:

$$\sum_{j,l \in T_i^k} 2rz_l p_l x_j^l \leq R_k + M(1 - x_{ik}) \quad \forall i, k$$

De no tenerse la densidad de los objetos pero si su peso, se pondrá definir su densidad, con este peso y el volumen de éste (se puede calcular con sus radios).

Por su parte, para desarrollar la restricción de equilibrio para empaquetamientos de este tipo la cantidad de puntos crece considerablemente al tener que definir más de una malla x , y , z de puntos, por los que el diseño de una malla más adecuada cobra aún más importancia en este tipo de empaquetamiento. En el caso de la restricción de equilibrio, este puede ser considerado sobre uno o dos ejes:

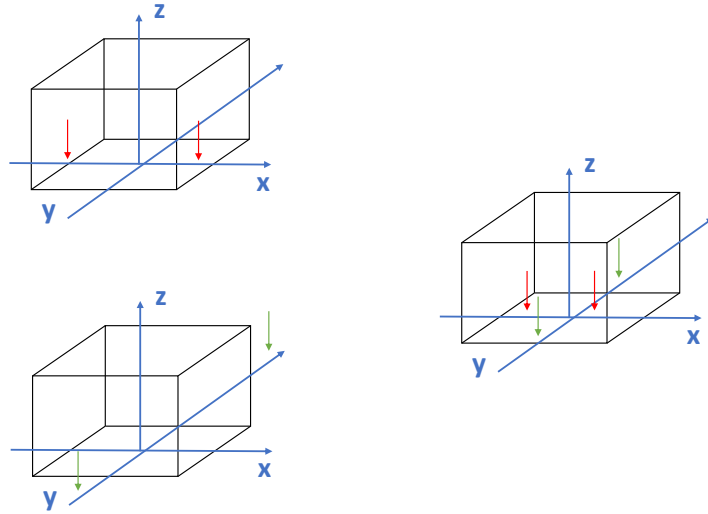


FIGURA 5.2: Representación de los objetos en sus 3 ejes

Se definió la zona media y las zonas laterales, por lo que para encontrar el equilibrio central dentro el contenedor se deben definir al menos seis zonas, además de las zonas superior e inferior.

Para definir ZIx , ZMx y ZDx que corresponden al equilibrio en el eje x se revisó la posición del punto de la malla correspondiente al eje, considerando a como el largo del contenedor en ese eje.

$$ZIx = i|\dot{x}_t \leq \frac{a}{3}, ZMx = i|\frac{a}{3} < \dot{x}_t < 2\frac{a}{3}, ZDx = i|\dot{x}_t \geq 2\frac{a}{3}$$

De forma semejante al definir ZIy , ZMy y ZDy que corresponden al equilibrio en el eje y se revisa la posición del punto de la malla, considerando h como el largo del contenedor en ese eje.

$$ZIy = i|\dot{y}_t \leq \frac{1}{3}, ZDy = i|\dot{y}_t \geq 2\frac{1}{3}, ZMy = i|\frac{1}{3} < \dot{y}_t < 2\frac{2}{3}$$

La ubicación del centroide en la parte inferior del contenedor en el empaquetamiento (eje z) también puede considerarse como:

$$CI = i|\dot{z}_t \geq \frac{h}{3}, CS = i|\dot{z}_t < \frac{h}{3}$$

5.2 EXPERIMENTACIÓN

5.2.1 GENERACIÓN DEL 1ER. ESCENARIO DE INSTANCIAS

Para realizar esta experimentación se utilizaron tres instancias A, B, C; usando un contenedor de medidas reales y la misma cantidad de puntos en la malla para todas las instancias, se consideran tres tipos de objetos rectangulares para las instancias A y B; para la C son considerados 5 tipos de objetos rectangulares.

No.	INSTANCIA	RESTRICCIÓN	% GAP	
B1	A	Volumen	0.5 %	
B2	B		0.5 %	
B3	C		0.5 %	
R1 (a, b)	A	Volumen	5 %	0.5 %
R2 (a, b)	B	Capacidad	5 %	0.5 %
R3	C	Resistencia	5 %	
E1	A	Volumen Equilibrio	0.5 %	
E2	B		0.5 %	
E3	C		5 %	
ER1	A	Volumen	0.5 %	
ER2	B	Capacidad	0,5 %	
ER3	C	Equilibrio Resistencia	5 %	

5.2.2 EQUIPO COMPUTACIONAL

Todas las instancias fueron ejecutadas utilizando el solver CPLEX versión 12.6; se implemento el lenguaje C++ para la construcción del modelado. La experimentación fue realizada en una computadora con procesador AMD, CPU FX8350, @ 4.0GHz con 8 núcleos-8 hilos y una memoria RAM de 32GB en un sistema operativo

Windows 7 de 64 bits.

5.2.3 Resultados

B1 INSTANCIA A (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	80	32x32x32	400	2.62	1	2000	221.54 segundos	22.795 m ³
2	90	51x36x32	1845	5.29				
3	994	32x26x18	23955.4	14.89				

En la imagen 5.1 se muestra el desarrollo de las instancias resuelto por el algoritmo exacto. En dónde el algoritmo exacto esta lo más cercano al óptimo con 0.5%. En la siguiente tabla se muestran los resultados de la experimentación para la instancia B1.

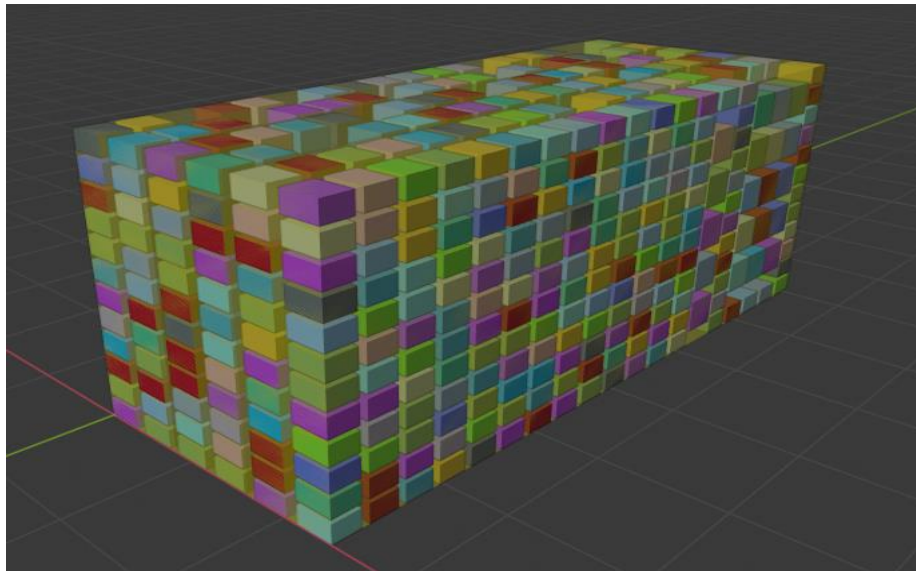


FIGURA 5.3: Resultado de la instancia B1

B2 INSTANCIA B (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	169	45x32x29	1183	7.06	1	2000	49.06 segundos	24.12 m ³
2	1	38x32x25	20	0.03				
3	994	34x24x21	25744.6	17.03				

En esta instancia, el modelo se construyó en un menor tiempo de ejecución; dando los siguientes resultados:

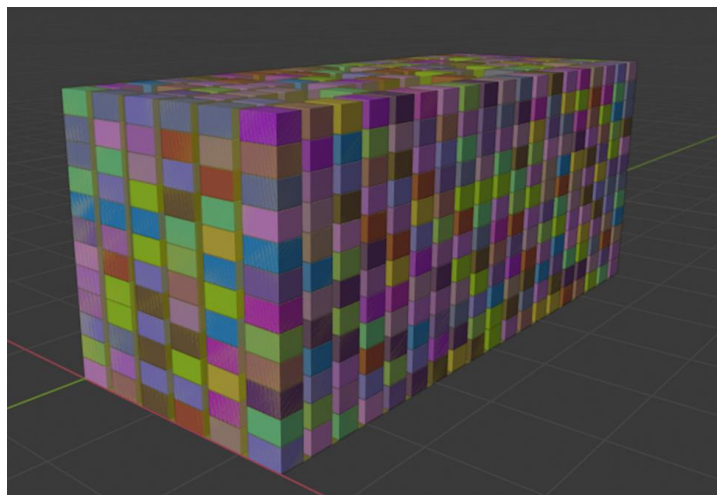


FIGURA 5.4: Resultado de la instancia B2

B3 INSTANCIA C (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	169	45x32x29	1183	7.06	1	2000	198.34 segundos	19.52 m ³
2	1	38x32x25	20	0.03				
3	419	34x24x21	10852.1	7.18				
4	170	33x26x28	3213.0	4.08				
5	42	58x24x20	567.0	1.17				

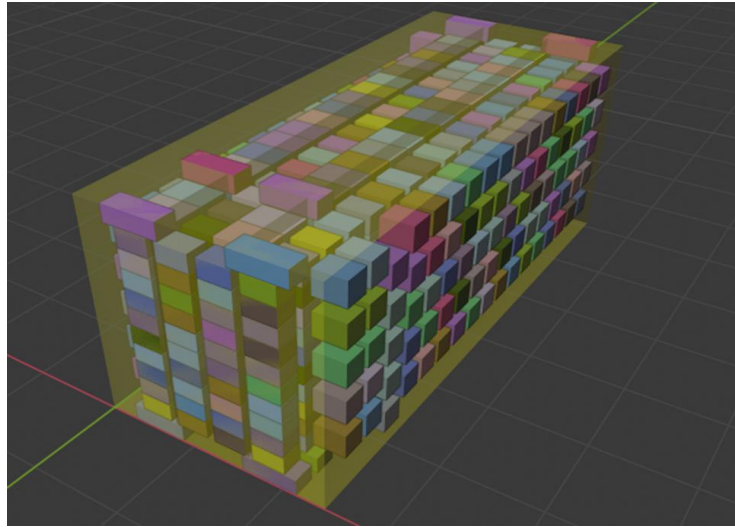


FIGURA 5.5: Resultado de la instancia B3

En esta instancia se experimento con 5 tipos de objetos, los cuales dieron un total en peso de 15835.1 kg en un contenedor de 20 pies; utilizando el mismo tamaño de mallado.

R1a Instancia A (Gap<5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	76	45x32x29	380	2.49	1	2000	246.80	22.428 m3
2	87	38x32x25	1783.5	5.11				
3	990	34x24x21	23859	14.83				

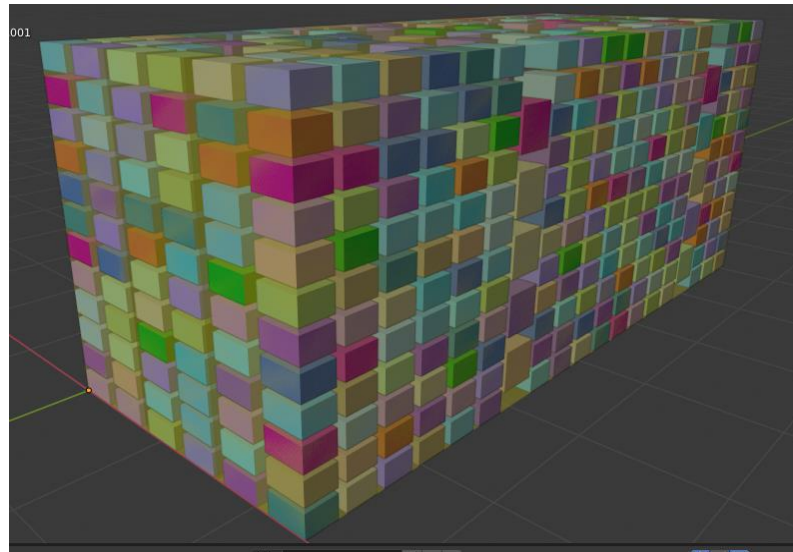


FIGURA 5.6: Resultado de la instancia R1a

Se decidió analizar la instancia cambiando el Gap lo más cercano posible al óptimo para analizar los resultados obtenidos, dado que la restricción de resistencia tiene un nivel de complejidad alto.

R1b Instancia A (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	79	45x32x29	395	2.59	1	2000	263.35 segundos	22.75 m ³
2	90	38x32x25	1845	5.29				
3	993	34x24x21	23931.3	14.87				

Esta instancia tuvo un peso total de los tipos de objetos ingresados dentro el contenedor de 26171.3 kg.

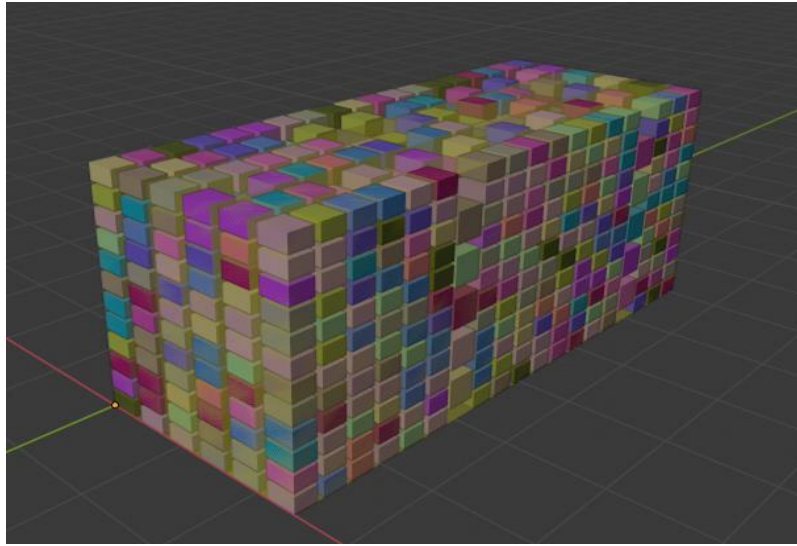


FIGURA 5.7: Resultado de la instancia R1b

R2a Instancia B (Gap < 5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	170	45x32x29	1190	7.1	1	2000	133.75	23.82 m3
2	1	38x32x25	20	0.03				
3	974	34x24x21	25666.9	16.69				

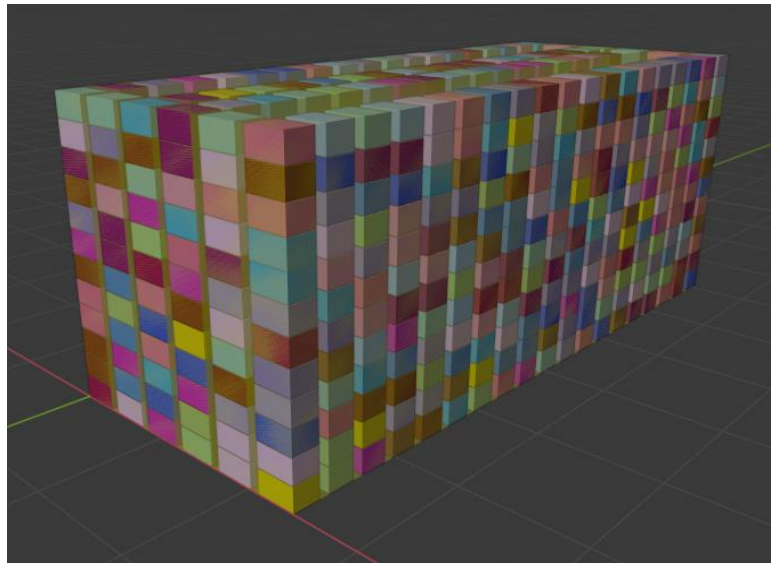


FIGURA 5.8: Resultado de la instancia R2a

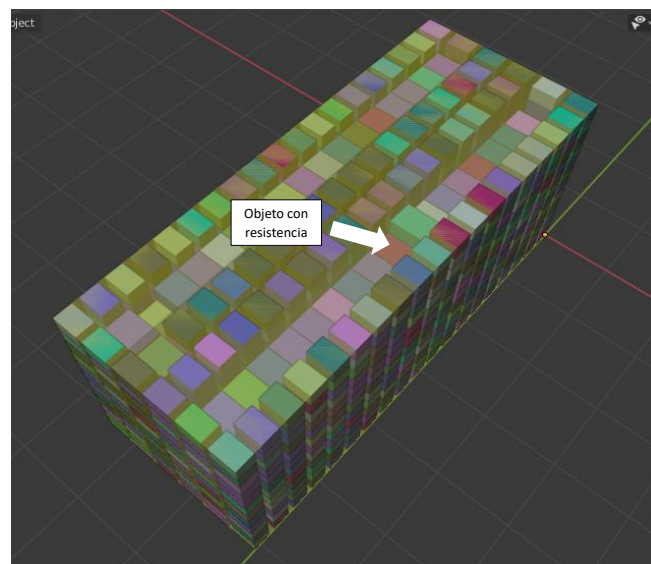


FIGURA 5.9: Vista del contenedor por la parte superior

R2b Instancia B (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	170	45x32x29	1190	7.2	1	2000	133.5 segundos	24.1113 m3
2	1	38x32x25	20	0.03				
3	991	34x24x21	25666.9	16.98				

Para la generación de esta instancia los resultados obtenidos fueron los siguientes:

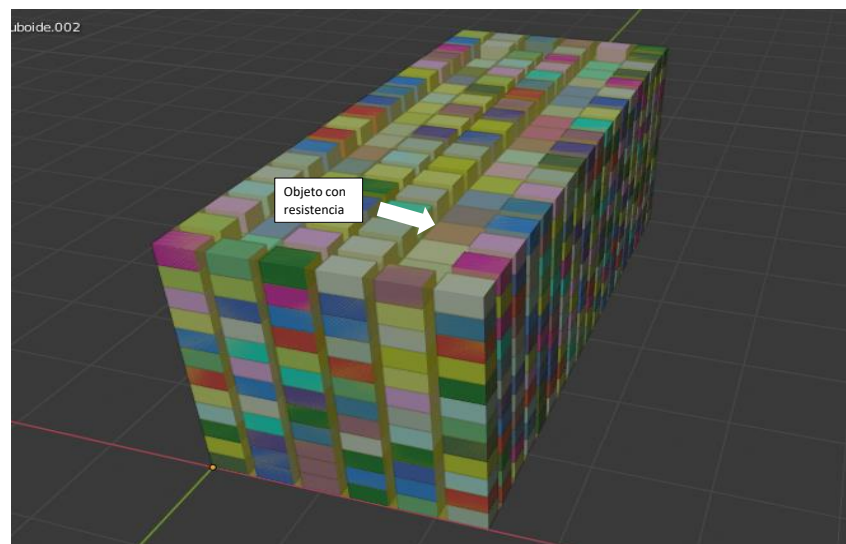


FIGURA 5.10: Resultado de la instancia R2b

R3 Instancia C (Gap<5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	165	45x32x29	1155	6.89	1	2000	579.06 segundos	19.47 m ³
2	2	38x32x25	40	0.06				
3	424	34x24x21	10981.6	7.27				
4	170	33x26x28	3213.0	4.08				
5	42	58x24x20	567.0	1.17				

Para esta instancia se trabajo con la restricción de resistencia y capacidad, dando los siguientes resultados para cinco tipos de objetos. El resultado fue un menor empaquetamiento, porque no se llego a la optimalidad y se alteraron lass dimensiones del rectángulo interior; al haber un objeto con radio menor en el eje z.

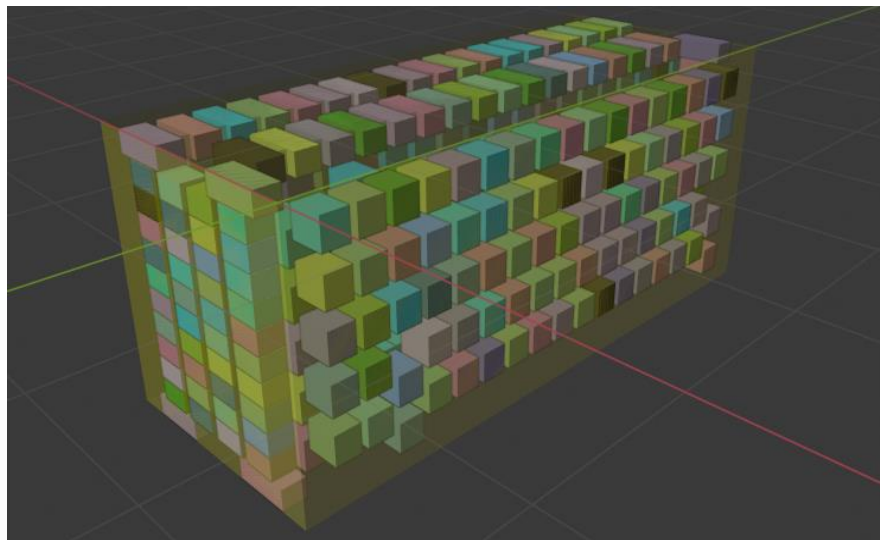


FIGURA 5.11: Resultado de la instancia R3

E1 Instancia A (Gap<0.5 %)

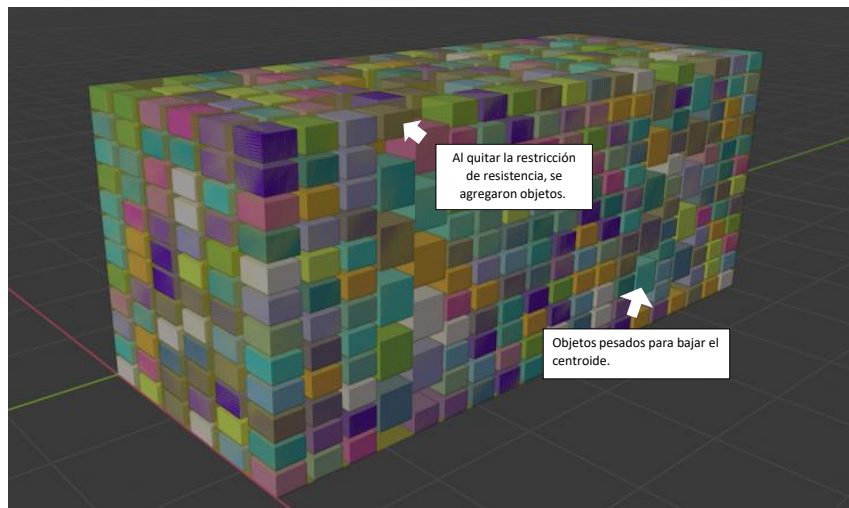


FIGURA 5.12: Resultado de la instancia E1

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	78	45x32x29	390	2.56	1	2000	251.61	22.76 m3
2	90	38x32x25	1845	5.29				
3	996	34x24x21	24003.6	14.92				

En la siguiente imagen se presentan las zonas centrales de los objetos con mayor peso.

E2 Instancia B (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	170	45x32x29	1190	7.1	1	2000	60.01	24.11 m3
2	1	38x32x25	20	0.03				
3	991	34x24x21	25666.9	16.98				

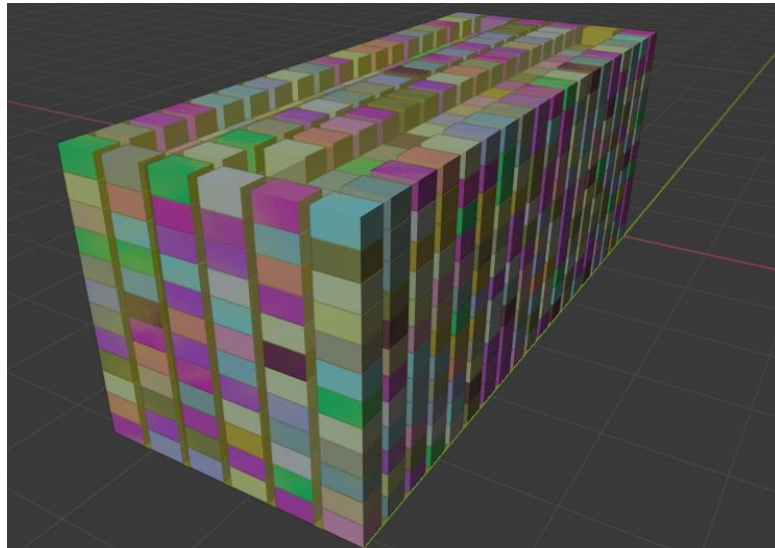


FIGURA 5.13: Resultado de la instancia E2

E3 Instancia C (Gap<5%)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	170	45x32x29	1190	7.1	1	2000	222.3	18.87 m3
2	160	38x32x25	3200	4.86				
3	100	34x24x21	2590	1.71				
4	170	33x26x28	3213	4.08				
5	40	58x24x20	540	1.11				

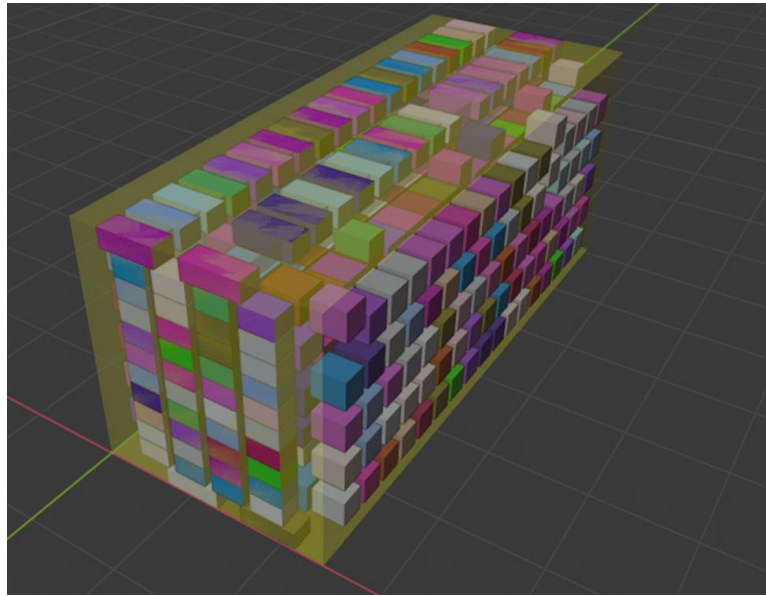


FIGURA 5.14: Resultado de la instancia E3

ER1 Instancia A (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	80	45x32x29	400	2.62	1	2000	273.43	22.795 m3
2	90	38x32x25	1845	5.29				
3	994	34x24x21	23955.44	14.89				

Se alcanzo optimalidad en esta instancia. En R1 y E1 se alcanzó un poco menos de volumen, no se alcanzo optimalidad; por lo que R1 y E1 deben alcanzar 22.795 en optimalidad.

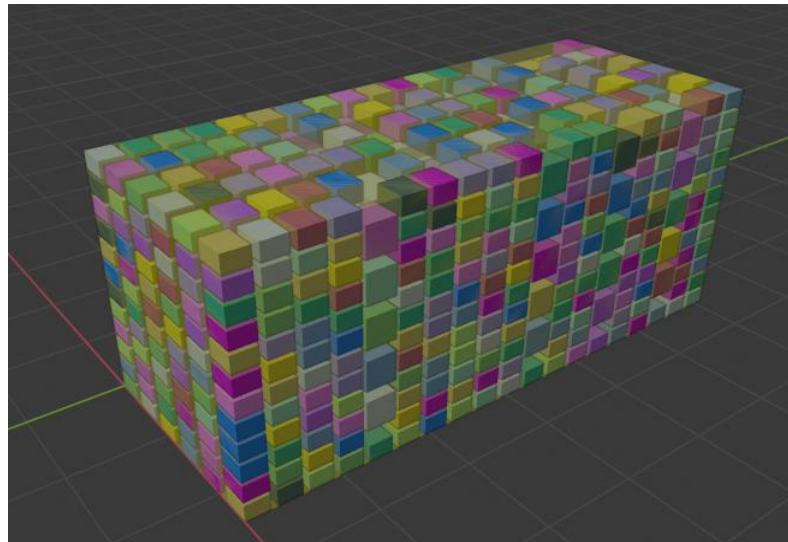


FIGURA 5.15: Resultado de la instancia ER1

ER2 Instancia B (Gap<0.5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	169	45x32x29	1183	7.06	1	2000	142.66	24.1039 m3
2	1	38x32x25	20	0.03				
3	993	34x24x21	25718.7	17.02				

ER3 Instancia C (Gap<5 %)

Tipo de objeto	No. de objetos	Medidas	Peso	Vol.	Min.	Máx.	Tiempo de ejecución	Volumen ocupado
1	150	45x32x29	1050	6.26	1	2000	1717	19.25 m3
2	2	38x32x25	40	0.06				
3	449	34x24x21	11629.1	7.69				
4	168	33x26x28	3175.2	4.04				
5	43	58x24x20	580.5	580.5				

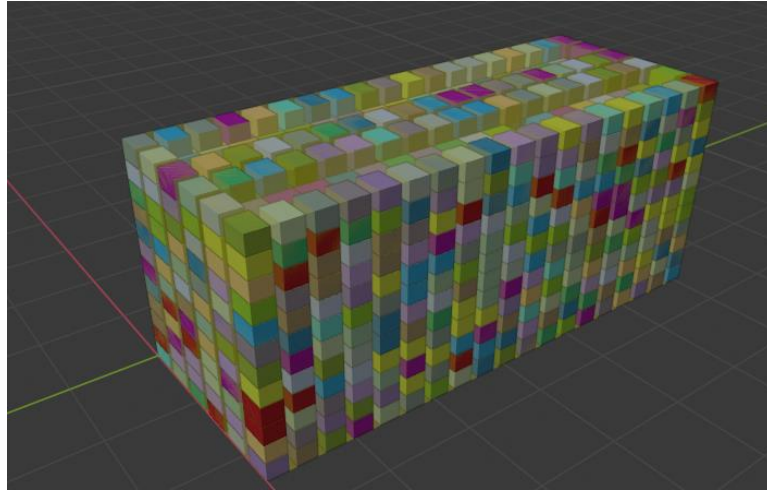


FIGURA 5.16: Resultado de la instancia ER2

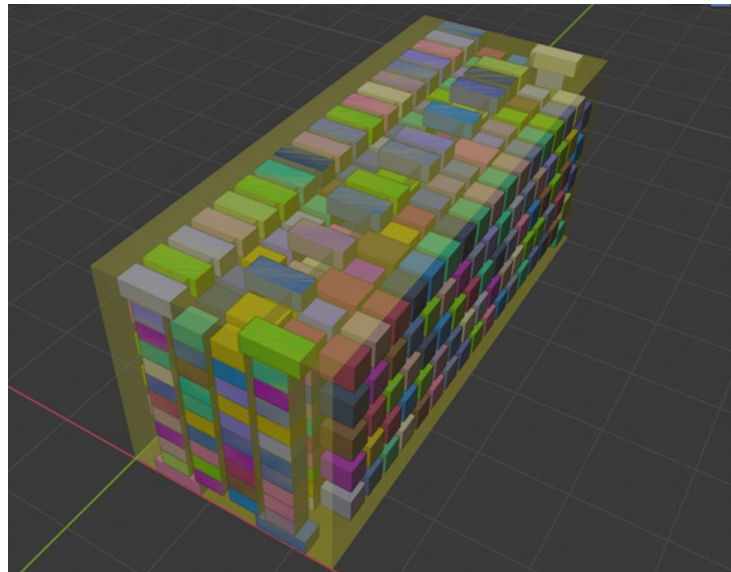


FIGURA 5.17: Resultado de la instancia ER3

La cantidad de restricciones en el modelo básico y agregando la restricción de equilibrio son casi las mismas, por lo que la diferencia en tiempo no es tan

significativa.

5.2.4 GENERACIÓN DEL 2DO. ESCENARIO DE INSTANCIAS

Se consideraron varios conjuntos de instancias para el segundo bloque de escenarios de acuerdo a sus características en común como lo son las dimensiones del contenedor, diferencias de tamaño, entre objetos, etc. Se definieron tres instancias para cada bloque de la experimentación realizada; el mallado considerado tiene relación con las dimensiones de los objetos en especial por que se genero un mallado único para cada bloque de instancias propuestas.

En este caso los escenarios para las instancias son las siguientes:

- Básico: solo considera el volumen de los objetos rectangulares a ingresar dentro el contenedor.
- Resistencia: se consideran la resistencia de los objetos rectangulares que soporten a otros encima de ellos.
- Equilibrio y resistencia: se consideran restricciones de ubicación de centroide de masa de los objetos rectangulares.

No.	INSTANCIA	RESTRICCIÓN	% GAP
B1	A	Volumen	1 %
B2	B		1 %
B3	C		1 %
R1	A	Volumen Resistencia	1 %
R2	B		1 %
R3	C		1 %
E1	A	Volumen Equilibrio	1 %
E2	B		1 %
E3	C		1 %
ER1	A	Volumen Equilibrio Resistencia	1 %
ER2	B		1 %
ER3	C		1 %

Cada instancia será llevada al mismo % de GAP mínimo en todos los escenarios. Se considerarán tres instancias A, B y C usando las mismas medidas del contenedor antes utilizado en la primera experimentación, la cantidad de puntos es la misma. En este caso se consideraron tres objetos diferentes para cada instancia desarrollada, como mínimo se colocó un objeto de cada tipo y mil como máximo de cada tipo.

Para generar dichos resultados se utilizó un contenedor (caja seca-high cube) con un volumen de 75.724 m³, capacidad de 23,0000 kg y se elaboró un mallado de 7x37x12.

INSTANCIA	PESO	RESISTENCIA	MEDIDAS DEL OBJETO
A	5	20	0.32m X 0.45m X 0.52m
B	7	28	0.32m X 0.32m X 0.39m
C	74.4	-	0.32m X 0.29m X 0.32m
A	3.1	-	0.27m X 0.41m X 0.22m
B	2.7	21.6	0.23m X 0.32m X 0.23m
C	111.5	-	0.47m X 0.37m X 0.23m
A	63	-	0.31m X 0.27m X 0.45m
B	60.6	242.4	0.38m X 0.33m X 0.22m
C	49.8	199.2	0.34m X 0.24m X 0.31m

En las siguientes imagenes se muestran los mejores acomodados que dio la construcción del modelo para este segundo bloque en cada uno de los escenarios descritos anteriormente.

Escenario con restricción de volumen de objetos

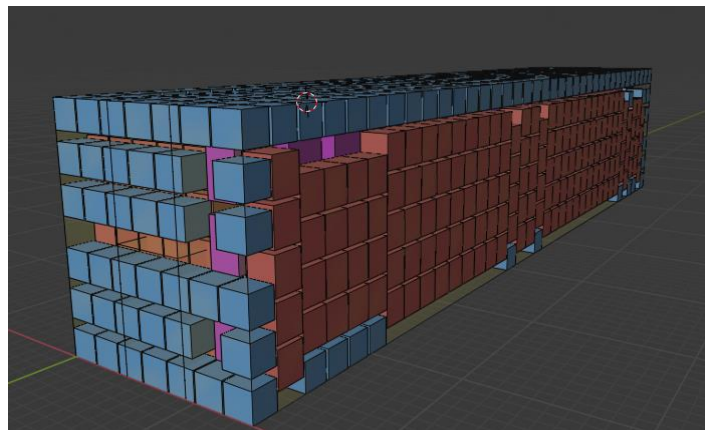


FIGURA 5.18: Volumen

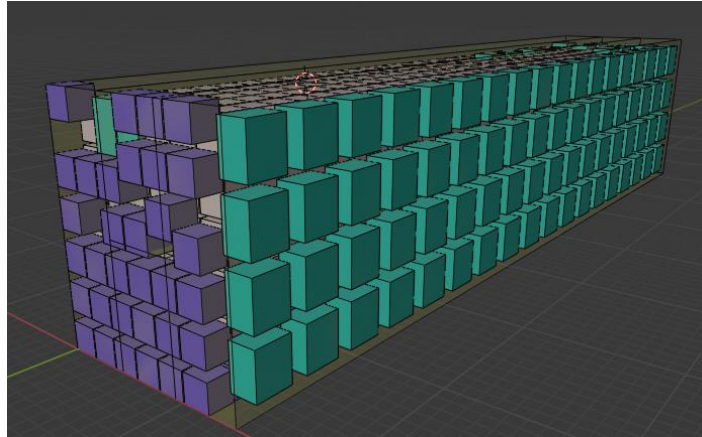
Escenario tomando en cuenta la resistencia de los objetos

FIGURA 5.19: Volumen + Resistencia

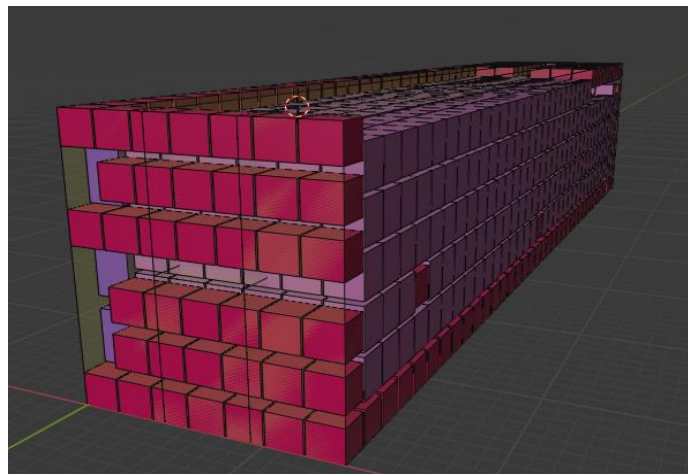
Escenario tomando en cuenta la distribución de la carga

FIGURA 5.20: Volumen + Equilibrio

Escenario con la resistencia de los objetos y su distribución

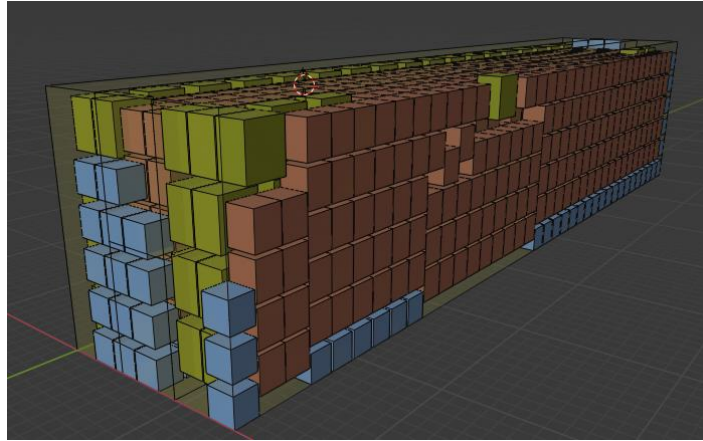


FIGURA 5.21: Volumen + Equilibrio + Resistencia

Es importante analizar el objeto que se carga dentro el contenedor, verificar el peso y considerar la resistencia del tipo de contenedor a utilizar. Numéricamente en este caso al calcular una cota de cuantos objetos por tipo cabrían en el contenedor solo considerando su peso, se encontro que los objetos eran muy pesados, aunque en volumen podrían caaber en gran cantidad, en peso la cantidad disminuye en menos de una tercera parte.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

No hay secretos para el éxito. Éste se alcanza preparándose, trabajando arduamente y aprendiendo del fracaso.

Colin Powell

6.1 ANÁLISIS DEL PRIMER ESCENARIO DE INSTANCIAS

En las siguientes tablas, se muestra un análisis detallado en tiempo de ejecución y el porcentaje del GAP de la experimentación. Se consideraron tres instancias A, B, y C en cuatro escenarios diferentes, en la siguiente tabla se muestran los resultados en cuanto al volumen ocupado por las cajas dentro el contenedor y el porcentaje del Gap en la construcción de los resultados en cada escenario.

ID	ESCENARIOS (INSTANCIAS)			
	V	V+C+R	V+E	V+C+E+R
A (GAP<0.05 %)	22.795	22.75	22.76	22.795
B (GAP <0,05 %)	24.12	24.11	24.11	24.103
C (GAP <5 %)	19.52	19.47	18.87	19.25

Para este análisis se realizó una comparación de los tiempos de ejecución en

cada escenario.

ID	TIEMPO (SEGUNDOS)			
	V	V+C+R	V+E	V+C+E+R
A (GAP<0.05 %)	221.54	263.35	251.61	273.43
B (GAP <0,05 %)	49.06	133.5	60.01	142.66
C (GAP <5 %)	198.34	579.06	222.3	1717

El tiempo de construcción del modelo en la instancia C fue relevante en la experimentación:

ID	TIEMPO (SEGUNDOS)			
	V	V+C+R	V+E	V+C+E+R
C (GAP<5 %)	67.84	189.046	68.56	210.914

Dado que fue la instancia en la que se utilizó la restricción de resistencia el porcentaje del GAP incremento más que en los otros.

6.2 ANÁLISIS DEL SEGUNDO ESCENARIO DE INSTANCIAS

En este escenario las instancias no alcanzaron el 0% del GAP por lo que puede haber un poco más de volumen en instancias que podrían tener menos restricciones, pero esta diferencia desaparece cuando se alcanza el GAP del 0%. Los resultados en volumen y tiempo para cada escenarios fueron los siguientes:

ID	ESCENARIOS (INSTANCIAS)			
	V	V + R	V + E	V + E + R
A	57.09	53.04	57.11	53.04
B	31.79	30.66	31.8	30.67
C	41	13.73	41	13.73

El tiempo de ejecución del modelo fueron los siguientes:

ID	TIEMPO (segundos)			
	V	V + R	V + E	V + E + R
A	485.67	3795.8	600.34	4998.52
B	974.92	2161.81	1118.28	3242.86
C	1497.4	6481.98	1056.06	5073.06

Luego de analizar los resultados, la cantidad de restricciones en el modelo y equilibrio son casi las mismas, por lo que la diferencia en tiempo no es tan significativa. Lo que da resultados favorables.

Los problemas de empaquetamiento constituyen una familia de problemas de optimización combinatoria, los cuales se producen en muchos campos de estudio. Para el desarrollo de este proyecto de investigación el problema de empaquetamiento de tipos de objetos rectangulares se aproximó utilizando una formulación entera basada en la aproximación de una malla dentro un contenedor.

La aplicación de técnicas de investigación cuantitativas contribuyeron a la resolución de problemas en la carga de contenedores; el tipo de objeto, la dimensión y complejidad han requerido del desarrollo de nuevos métodos de investigación de operaciones y de la creación de otras estrategias de solución para el problema. De acuerdo a los resultados obtenidos en las instancias propuestas y utilizando el modelo matemático desarrollado en esta investigación, se puede concluir que se lograron buenos empaquetamientos (considerando el volumen ocupado del contenedor) para estas instancias en un tiempo computacional razonable para las empresas; además de poder definir el impacto en las soluciones para el volumen y tiempo de solución, considerando restricciones adicionales como son las de equilibrio o las de resistencia. Se puede obtener mejores soluciones, considerando mallados más densos, pero se tiene que considerar el tiempo de cálculo del modelo que es muy necesario para alcanzar buenas soluciones.

En este trabajo de investigación se exploró la posibilidad de modelar un modelo

clásico de empaquetamiento con restricciones relevantes en las operaciones logísticas de una empresa para carga a granel, logrando con esto crear una línea de investigación futura para ese tipo de problemas. El modelo exacto dio resultados cercanos al óptimo para la malla considerada, mallas más densas pueden alcanzar soluciones cercana al óptimo del empaquetamiento, pero hay que considerar que se incrementaría el tiempo de solución para alcanzar estas soluciones. Con las soluciones dadas en la experimentación realizada se muestra que es posible minimizar el desperdicio del espacio del contenedor sin exceder su capacidad total y considerando la resistencia individual de los objetos, dependiendo el tipo de mallado y los tipos de objetos a ingresar.

6.3 TRABAJO FUTURO

Como trabajo a futuro se espera abordar problemas de mayor escala; considerar un servicio online como Neos o DOplexcloud para resolver instancias más grandes, agregar otras restricciones usadas en las operaciones logísticas de las empresas como considerar el uso de palets, entre otros tipos de restricciones comunes en la práctica para este problema y agregarlos al modelo desarrollado en esta tesis; aplicar el modelo a casos de estudio y analizar los resultados. Considerar el uso de este modelo matemático para el problema de empaquetamiento como la base de otras líneas de investigación; analizar la aplicación de otras formas del modelo básico para empaquetamiento de tres dimensiones.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUIRRE, D. M. C. y A. J. U. RODRÍGUEZ (2007), «Logística de operaciones: integrando las decisiones estratégicas para la competitividad», *Ingeniería Industrial*, **28**(1), pág. 5.
- AKEB, H., M. HIFI y R. M'HALLAH (2009), «A beam search algorithm for the circular packing problem», *Computers & Operations Research*, **36**(5), págs. 1513–1528.
- ALVAREZ-VALDÉS, R., F. PARREÑO y J. M. TAMARIT (2008), «Reactive GRASP for the strip-packing problem», *Computers & Operations Research*, **35**(4), págs. 1065–1083.
- BABU, A. R. y N. R. BABU (2001), «A generic approach for nesting of 2-D parts in 2-D sheets using genetic and heuristic algorithms», *Computer-Aided Design*, **33**(12), págs. 879–891.
- BEASLEY, J. (1985), «An exact two-dimensional non-guillotine cutting tree search procedure», *Operations Research*, **33**(1), págs. 49–64.
- BISCHOFF, E. E. y M. RATCLIFF (1995), «Issues in the development of approaches to container loading», *Omega*, **23**(4), págs. 377–390.
- BORTFELDT, A. y G. WÄSCHER (2013), «Constraints in container loading—A state-of-the-art review», *European Journal of Operational Research*, **229**(1), págs. 1–20.
- CHEN, C.-C., P.-L. SU, C.-B. CHIOU y K.-T. CHIANG (2011), «Experimental investigation of designed parameters on dimension shrinkage of injection molded

- thin-wall part by integrated response surface methodology and genetic algorithm: A case study», *Materials and Manufacturing Processes*, **26**(3), págs. 534–540.
- COFFMAN JR, E. G., D. S. JOHNSON, P. W. SHOR y R. R. WEBER (1997), «Bin packing with discrete item sizes, Part II: Tight bounds on First Fit», *Random Structures & Algorithms*, **10**(1-2), págs. 69–101.
- CORRECHER, J. F., M. ALONSO, F. PARREÑO y R. ALVAREZ-VALDÉS (2017), «Solving a large multicontainer loading problem in the car manufacturing industry», *Computers & Operations Research*, **82**, págs. 139–152.
- COSTA, M. D. G. y M. E. CAPTIVO (2016), «Weight distribution in container loading: a case study», *International Transactions in Operational Research*, **23**(1-2), págs. 239–263.
- DE CASTRO SILVA, J., N. SOMA y N. MACULAN (2003), «A greedy search for the three-dimensional bin packing problem: the packing static stability case», *International Transactions in Operational Research*, **10**(2), págs. 141–153.
- DYCKHOFF, H. (1990), «A typology of cutting and packing problems», *European Journal of Operational Research*, **44**(2), págs. 145–159.
- FANTONI, A. L. C. (2003), *Envase y embalaje:(la venta silenciosa)*, ESIC Editorial.
- FUENTES, K. G. y E. N. PARRA (2016), «Problema de Carga de Contenedores (Container Loading Problem)», .
- GALIEV, S. I. y M. S. LISAFINA (2013), «Linear models for the approximate solution of the problem of packing equal circles into a given domain», *European Journal of Operational Research*, **230**(3), págs. 505–514.
- GAREY, M. R., R. L. GRAHAM, D. S. JOHNSON y A. C.-C. YAO (1976), «Resource constrained scheduling as generalized bin packing», *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, págs. 257–298.

- GAREY, M. R. y D. S. JOHNSON (1981), «Approximation algorithms for bin packing problems: A survey», en *Analysis and design of algorithms in combinatorial optimization*, Springer, págs. 147–172.
- GRASON, G. M. (2015), «Colloquium: Geometry and optimal packing of twisted columns and filaments», *Reviews of Modern Physics*, **87**(2), pág. 401.
- HAESSLER, R. W. y F. B. TALBOT (1990), «Load planning for shipments of low density products», *European Journal of Operational Research*, **44**(2), págs. 289–299.
- HANDFIELD, R. y E. NICHOLS JR (1999), «Introduction to Supply Chain Management», *Supply Chain Management*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- HIFI, M. y R. M'HALLAH (2009), «A literature review on circle and sphere packing problems: models and methodologies», *Advances in Operations Research*, **2009**.
- KARELAHTI, J. (2002), «Solving the cutting stock problem in the steel industry», *Department of Engineering Physics and Mathematics. Helsinki University of Technology*, págs. 2–5.
- LIM, A. y X. ZHANG (2005), «The container loading problem», en *Proceedings of the 2005 ACM symposium on Applied computing*, ACM, págs. 913–917.
- LITVINCHEV, I. y E. OZUNA (2014), «Approximate packing circles in a rectangular container: valid inequalities and nesting», *Journal of applied research and technology*, **12**(4), págs. 716–723.
- LIU, J., Y. YUE, Z. DONG, C. MAPLE y M. KEECH (2011), «A novel hybrid tabu search approach to container loading», *Computers & Operations Research*, **38**(4), págs. 797–807.
- LÓPEZ, C. O. y J. E. BEASLEY (2011), «A heuristic for the circle packing problem with a variety of containers», *European Journal of Operational Research*, **214**(3), págs. 512–525.

- MOSQUERA ARTAMONOV, J. D. (2016), *Empaquetamiento de objetos regulares en un contenedor rectangular.*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- OLSSON, J., T. LARSSON y N.-H. QUTTINEH (2020), «Automating the planning of container loading for Atlas Copco: Coping with real-life stacking and stability constraints», *European Journal of Operational Research*, **280**(3), págs. 1018–1034.
- PARREÑO, F., R. ALVAREZ-VALDÉS, J. F. OLIVEIRA y J. M. TAMARIT (2010), «A hybrid GRASP/VND algorithm for two-and three-dimensional bin packing», *Annals of Operations Research*, **179**(1), págs. 203–220.
- PEDROSO, J. P., S. CUNHA y J. N. TAVARES (2016), «Recursive circle packing problems», *International Transactions in Operational Research*, **23**(1-2), págs. 355–368.
- PÉREZ CANO, A. I. (2017), «Problema de transporte multiterminal y contenedores MultiSize: dos enfoques metaheurísticos con Python», .
- PISINGER, D. (1997), «A minimal algorithm for the 0-1 knapsack problem», *Operations Research*, **45**(5), págs. 758–767.
- PISINGER, D. (2002), «Heuristics for the container loading problem», *European journal of operational research*, **141**(2), págs. 382–392.
- SAIPE, A. (2013), «The impact of logistics services on E-commerce in Canada, J», *Industry Canada*, págs. 77–86.
- SANTOS RAMOS, A. M. (2017), «Análisis, diseño e implementación de un software que determine la planificación de carga de un Contenedor», .
- SUTOU, A. y Y. DAI (2002), «Global optimization approach to unequal global optimization approach to unequal sphere packing problems in 3D», *Journal of Optimization Theory and Applications*, págs. 671–694.

WÄSCHER, G., H. HAUSSNER y H. SCHUMANN (2007), «An improved typology of cutting and packing problems», *European journal of operational research*, **183**(3), págs. 1109–1130.

WHITE, D. (1992), «A complementary greedy heuristic for the knapsack problem», *European journal of operational research*, **62**(1), págs. 85–95.

WILSON, R. C. (1965), «A packaging problem», *Management Science*, **12**(4), págs. B–135.

WINSTON, W. L. y J. B. GOLDBERG (2005), *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*, tomo 4, Thomson.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Guadalupe Estefanía Pérez de la O
Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

PROBLEMA DE EMPAQUETAMIENTO EN LA CARGA DE
CONTENEDORES

Nací el 16 de enero de 1993, originaria de Villahermosa, Tabasco; mis padres ejemplos a seguir por tantos esfuerzos mi madre la sra. Lorenza de la O Valencia, mis abuelos el sr. Santiago de la O Mayo y la sra. Dominga Valencia Chablé. Egresada del Instituto Tecnológico de Villahermosa Tabasco como Ingeniero Industrial; así como culminar una especialidad en Calidad y Productividad.