

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

El problema del almacenamiento en bloque. Revisión y propuesta.

Autor: Juan Molina Ponce

Tutor: Luis Onieva Giménez

**Dep. Organización Industrial y Gestión de  
Empresas II**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

# **El problema del almacenamiento en bloque. Revisión y propuesta.**

Autor:  
Juan Molina Ponce

Tutor:  
Luis Onieva Giménez  
Catedrático

Dep. Organización Industrial y Gestión de Empresas II  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado: El problema del almacenamiento en bloque. Revisión y propuesta.

Autor: Juan Molina Ponce

Tutor: Luis Onieva Giménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



# Resumen

---

En el presente Trabajo Fin de Grado se exponen y revisan tres métodos de almacenamiento en bloque comúnmente utilizados en la industria. Estos métodos se centran en apilar unidades de almacenamiento de una manera compacta, en lugar de unidades aisladas o almacenes con poca densidad de almacenamiento. A modo de introducción se presenta una pequeña reseña acerca de conceptos básicos de almacenamiento, almacenes, estanterías, equipo de manutención entre otros. Posteriormente se pasa a exponer de manera individual cada uno de los métodos, introduciendo cada uno de ellos con una revisión de la literatura encontrada. Las tres estrategias de diseño elegidas para ser expuestas han sido los métodos de almacenamiento de alta densidad, de almacenamiento en altura y de optimización de la profundidad de las líneas en un almacén compacto. Cada uno de ellos está resuelto con un algoritmo o procedimiento diferente expuestos en el correspondiente apartado. Se llega entonces a la conclusión de que sería conveniente combinar dos métodos de los anteriormente explicados para obtener uno más completo de diseño de almacenes. Para justificar esta conclusión se añade un ejemplo de aplicación en el que se realiza un diseño completo de manera particular utilizando este método propuesto. Y como punto final al proyecto se exponen las conclusiones tanto de manera individual como general de los diferentes procedimientos revisados.



# Abstract

---

This project presents three block-stacking methods, commonly used in the industry. These methods are focused on stacking compactly Stock Keeping Units (SKUs), rather than isolated units or warehouses sparsely storage. Firstly, it is presented an introduction about basic storage concepts, warehouses, racks, handling equipment, etc. After that, we expose each one of this methods individually, introducing each one with a review of the literature. Three strategies have been chosen to be exposed: storage high density method, height storage method and optimising lane depth method in a warehouse. Each one of this three methods is solved with a different algorithm or procedure explained in the corresponding section. We can summarize this article saying that it would be desirable to combine two of the methods previously explained obtaining another one. This method will be much more complete. Just to justify this conclusión, a practical application example is exposed. This one performs a complete warehouse design usinh this last method. Finally, we try to explain the conclusions of the different procedures reviewed, in a general and in an individual way.



# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Notación</b>	<b>xvi</b>
<b>1 OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivos y justificación</i>	1
1.2 <i>Estructura del documento</i>	1
1.3 <i>Agradecimientos</i>	2
<b>2 INTRODUCCIÓN AL ALMACENAMIENTO</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Almacenamiento</i>	3
2.2 <i>Tipos de almacén</i>	5
2.3 <i>Tipos de estantería o de módulos de almacenamiento</i>	8
2.3.1 <i>Almacenamiento en Bloque</i>	8
2.3.2 <i>Estanterías convencionales</i>	9
2.3.3 <i>Estanterías dobles</i>	10
2.3.4 <i>Estanterías compactas</i>	11
2.3.5 <i>Estanterías dinámicas</i>	13
2.3.6 <i>Estanterías móviles</i>	13
2.3.7 <i>Almacenes rotativos</i>	14
2.3.8 <i>Almacenes automáticos</i>	15
2.3.9 <i>Almacenes especiales</i>	16
2.4 <i>Tipos de elementos de manejo de materiales</i>	17
2.4.1 <i>Elementos de manipulación que mueven sin trasladarse</i>	17
2.4.2 <i>Elementos de manipulación que mueven y se trasladan</i>	18
2.5 <i>Distribución almacén</i>	20
<b>3 Métodos de apilamiento en bloque</b>	<b>21</b>
3.1 <i>Método de almacenamiento de alta densidad</i>	21
3.1.1 <i>Maximización de la densidad de almacenamiento. Algoritmo</i>	22
3.2 <i>Método de almacenamiento en altura</i>	25
3.2.1 <i>Algoritmo Genético</i>	25
3.2.2 <i>Método heurístico de localización</i>	29
3.2.3 <i>Evaluación de la información de grupo para el número esperado de reubicaciones</i>	30
3.3 <i>Método de optimización de la profundidad para almacenamiento en bloque</i>	32
3.3.1 <i><math>P = \infty</math>, tasa de demanda constante</i>	33
3.3.2 <i><math>P &gt; \lambda</math>, tasa de demanda constante</i>	36

3.3.3	P < $\lambda$ , tasa de demanda constante	40
3.3.4	Método propuesto	43
<b>4</b>	<b>Aplicación práctica</b>	<b>44</b>
4.1	<i>Fase I. Aplicación para el método de cálculo de profundidad óptima</i>	44
4.1.1	Profundidad, x=3 pallets	44
4.1.2	Profundidad, x=2 pallets	47
4.1.3	Profundidad, x=1 pallet	48
4.1.4	Profundidad, x=4 pallets	50
4.1.5	Comparación de datos	52
4.2	<i>Fase II. Aplicación de cálculo para el método de almacenamiento de alta densidad</i>	53
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

*Tabla 1: Secuencia de estados de pilas o estanterías según prioridad para la ubicación de cargas entrantes.* 29

*Tabla 2: Resultado simulación Algoritmo Genético aplicado al caso  $n=12$   $m=3$ .* 31

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura 1: Esquema cadena de suministros. Fuente: <a href="http://www.logisticabroz.com">www.logisticabroz.com</a></i>	4
<i>Figura 2: Gráfico representativo de costes de logística.</i>	4
<i>Figura 3: Almacén de materias primas.</i>	5
<i>Figura 4: Almacenamiento de alta densidad.</i>	6
<i>Figura 5: Diagrama de bloques tipos de almacén según función logística.</i>	7
<i>Figura 6: Sistema de picking automatizado.</i>	8
<i>Figura 7: Esquema de almacenamiento en bloque.</i>	9
<i>Figura 8: Reproducción virtual de modelo de estanterías convencionales.</i>	10
<i>Figura 9: Almacén con estanterías de doble profundidad.</i>	11
<i>Figura 10: "Drive-through". Fuente: <a href="http://www.mecalux.es">www.mecalux.es</a> / Figura 11: "Drive-in".</i>	12
<i>Figura 12: estanterías push-back.</i>	12
<i>Figura 13: Representación estantería dinámica.</i>	13
<i>Figura 14: Estanterías móviles.</i>	14
<i>Figura 15c: Almacén tipo carrusel.</i>	14
<i>Figura 16: Almacén ASRS.</i>	16
<i>Figura 17: Almacén especial productos largos.</i>	16
<i>Figura 18: Puente grúa.</i>	18
<i>Figura 19: Sistema AGV's.</i>	19
<i>Figura 20: Gráfica para el uso de elementos de manutención.</i>	20
<i>Figura 21: Representación gráfica algoritmo de almacenamiento de alta densidad.</i>	23
<i>Figura 22: Algoritmo de Ocupación-Rotación.</i>	24
<i>Figura 23: Pseudocódigo Algoritmo Genético Simple.</i>	27
<i>Figura 24: Ejemplo de operador de cruce aplicado a cromosomas..</i>	28
<i>Figura 25: Ejemplo operador de mutación aplicado a cromosoma.</i>	28
<i>Figura 26: Inventario en sistema con <math>P</math> infinita y demanda constante.</i>	33
<i>Figura 27: Comportamiento nivel inventario en sistema con <math>P &gt; \lambda</math> y demanda constante.</i>	37
<i>Figura 28: Gráfica de desperdicio frente a utilización.</i>	39
<i>Figura 29: Comportamiento inventario frente a tiempo, caso <math>P &lt; \lambda</math>.</i>	41
<i>Figura 30: Esquema método propuesto. Fuente: elaboración propia.</i>	43
<i>Figura 31: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de <math>x=3</math> pallets.</i>	46
<i>Figura 32: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario.</i>	46
<i>Figura 33: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de <math>x=2</math> pallet.</i>	47
<i>Figura 34: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario(<math>x=2</math>).</i>	48

<i>Figura 35: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de <math>x=1</math> pallet.</i>	49
<i>Figura 36: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario(<math>x=1</math>).</i>	50
<i>Figura 37: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de <math>x=4</math> pallets.</i>	51
<i>Figura 38: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario(<math>x=4</math>).</i>	51
<i>Figura 39: Gráfico comparativo desperdicio promedio respecto a diferentes profundidades.</i>	52
<i>Figura 40: Resultados para <math>i=21, j= [15...18]</math>. Fuente:</i>	53
<i>Figura 41: Resultados para <math>i=22, j= [15...18]</math>.</i>	54
<i>Figura 42: Resultados para <math>i=23, j= [15...18]</math>.</i>	54
<i>Figura 43: Resultados para <math>i=24, j= [15...18]</math>.</i>	54
<i>Figura 44: Resultados para <math>i=25, j= [15...18]</math>.</i>	55
<i>Figura 45: Resultados para <math>i=26, j= [15...18]</math>.</i>	55
<i>Figura 46: Resultados para <math>i=27, j= [15...18]</math>.</i>	55
<i>Figura 47: Resultados para <math>i=28, j= [15...18]</math>.</i>	56

# Notación

---

a: anchura de pasillo (uds. pallet).

h: altura de un pallet de una referencia (uds. de longitud).

e: altura libre del almacén (uds. pallet).

n: número de SKU's o referencias.

T: tiempo de ciclo de inventario.

$O_T$ : espacio ocupado en el tiempo de ciclo de inventario.

U: utilización de espacio para el caso de única SKU.

$U_c$ : utilización de espacio para la profundidad de carril común, para el caso de varias SKU's.

z: altura de la estantería o módulo de apilamiento (uds. pallet).

Q: cantidad de producto que contiene un lote (uds. pallet)

SKU: (Stock Keeping Unit) Unidad de almacenamiento.

P: ratio de producción (uds. pallet/ud. tiempo).

$\lambda$ : ratio de descarga (uds. pallet/ud. tiempo).

x: profundidad de línea o carril (uds. pallet).

$x^*$ : profundidad óptima de carril para un única referencia o SKU (uds. pallet).

$x_c^*$ : profundidad óptima de carril común para varias SKU's (uds. pallet).

H: máximo nivel de inventario (uds. pallet).

K: aproximación del número máximo de líneas requeridas para el almacenamiento.

Dh: desperdicio de espacio de almacenamiento provocado por "honeycombing".

Da: desperdicio de espacio de almacenamiento a causa de los pasillos.

Du: desperdicio por las posiciones no ocupadas en la parte alta de los carriles.

D: desperdicio promedio de espacio de almacenamiento, para el caso de una referencia.

$D_c$ : desperdicio de espacio de almacenamiento promedio para la profundidad común de línea.



# 1 OBJETIVOS

---

## 1.1 Objetivos y justificación

Este trabajo está basado en la revisión de una serie de métodos de almacenamiento y la propuesta de un procedimiento de diseño más completo, basado en los revisados anteriormente.

Los métodos de almacenamiento revisados, son concretamente para el almacenamiento en bloque. Para un correcto análisis, se realiza una introducción a conceptos logísticos y pertenecientes a almacenes, tipos existentes y tipo de maquinaria de manutención, entre otros. Los tres métodos presentados son diferentes entre sí y se han expuesto para distintas situaciones o escenarios. Para una exposición adecuada de dichos métodos se ha llevado a cabo una revisión de numerosos artículos de diversos autores acerca del tema a tratar o sobre temas colindantes con el que ocupa este trabajo.

El objetivo principal de este documento es obtener conclusiones a partir de estudios realizados, por otros autores, acerca del almacenamiento en bloque; así como poder establecer qué tipo de método será más apropiado dependiendo de las condiciones del almacén, de los niveles de demanda, ritmos de producción almacenado y descarga, etc.

La introducción acerca de términos relacionados con el estudio comentado anteriormente, expondrá las bases del almacenamiento, los diferentes tipos de almacenes existentes, tipos de estanterías, diferentes elementos de manipulación de elementos para almacenar y una pequeña explicación de las diferentes zonas que componen un almacén.

Los métodos expuestos serán tres: el método de alta densidad, el de apilamiento en altura y el de apilamiento en bloque optimizando la profundidad. Cada uno de ellos aparecerá desglosado en distintos sub- apartados con los diferentes casos y escenarios revisados.

Además de estos tres expuestos, se propone un cuarto método para el diseño de un almacén, que será explicado en el siguiente apartado.

Se realizará algún ejemplo de aplicación práctica que sirva de apoyo a la explicación de los métodos.

## 1.2 Estructura del documento

El documento consta de seis capítulos cada uno de ellos dividido en sus consiguientes apartados y subapartados. El primer capítulo contiene la introducción al contenido que se presenta y los objetivos que se buscan con la realización de este proyecto, justificando el camino tomado para la explicación de la metodología elegida. Seguidos estos objetivos de la estructura del trabajo y de los agradecimientos por parte del autor para terminar este primer capítulo.

En el segundo capítulo se lleva a cabo una introducción acerca de almacenamiento en términos generales además de campos que se han considerado de importancia para una mejor comprensión de este trabajo. Estos campos son algunos como los tipos de almacenes, estanterías, maquinaria de manutención y diferentes zonas que aparecen dentro de un almacén, poniendo así punto final a esta introducción a conceptos logísticos de almacenamiento.

El tercer capítulo ocupa la parte importante de este trabajo ya que expone los tres métodos elegidos para

diseñar zonas de almacén, divididas estas en apartados, uno para cada método, el de alta densidad, el de apilamiento en altura y el de optimización de la profundidad de las líneas. Cada apartado tendrá diferentes subdivisiones que intentan explicar de la mejor manera posible como se ejecuta cada método, los algoritmos ecuaciones que utilizan acompañados de ilustraciones gráficas, y pequeñas conclusiones que surgen de la explicación de estos. Añadiendo un último apartado en el que se propone un método de diseño más completo.

El cuarto capítulo se dedica a particularizar para un caso determinado un diseño realizado con el método expuesto en este trabajo obteniendo resultados numéricos que dan una idea con mayor claridad de como estos modelos optimizarían los sistemas tomando unos valores para las variables principales, como pueden ser la profundidad o las dimensiones de la zona de almacenamiento.

Poniendo prácticamente fin a este trabajo se presentan en el quinto capítulo las conclusiones tanto individuales para cada método expuesto como conjuntamente para una síntesis de los tres. Aunque estas han ido siendo comentadas en anteriores capítulos.

En el sexto y último capítulo se expone la bibliografía en primer lugar de las imágenes añadidas al trabajo y en segundo lugar de los artículos y autores en los que se ha apoyado la revisión llevada a cabo durante la elaboración del presente documento.

### **1.3 Agradecimientos**

En primer lugar quisiera agradecer todas las atenciones prestadas por mi tutor para este trabajo que siempre ha tenido una respuesta a mis dudas y unas palabras de ánimo.

Este trabajo no hubiera sido posible realizarlo sin el apoyo durante estos años de carrera de mis compañeros que de tanto apoyo me han servido y me han hecho no desanimarme nunca. Gracias Luis, Carlos, Manuel además de muchos otros que han pasado por mi lado durante estos años.

Sin olvidar a mi familia que siempre confió en mi capacidad para conseguir esta meta que ya me marque hace años, mi madre y mi hermano que nunca me han fallado y mi padre que aunque siempre ha sido crítico, mi objetivo de no decepcionarle siempre me hizo avanzar.

Y por último quisiera también agradecer todo el apoyo prestado y los consejos dados por mi pareja, Ana, a la que siempre le deberé una pequeña parte de este logro que tanto supone para mí.

# 2 INTRODUCCIÓN AL ALMACENAMIENTO

---

## 2.1 Almacenamiento

Se define en este apartado el significado de almacenar, en el contexto en el que se centra este trabajo. El significado riguroso sería, “1.Poner o guardar en almacén. 2. Reunir, guardar o registrar en cantidad algo” (RAE). Con otras palabras dicho almacenar es cualquier procedimiento con el que consigamos guardar, ya sea a corto o a largo plazo, un artículo, producto, objeto, que no esté en proceso de fabricación ni de transporte. En este trabajo se hablará normalmente de unidades de almacenamiento, en adelante SKU's (Stock-Keeping Unit). Y que nos servirán para abstraernos de la amplia variedad de unidades de almacenamiento dependiendo del tipo de producto o elemento guardado.

Surge la pregunta de ¿por qué almacenar?, se puede decir que el almacén actúa dentro de la cadena de suministros como una válvula que controla el mercado a través de:

- El equilibrio de la producción en serie y mecanizada con la demanda imprevisible.
- El equilibrio de la producción irregular y estacional con la demanda a lo largo del año.
- La acumulación de existencias para las puntas de demandas estacionales.
- La redistribución entre el fabricante y el punto o comercio del detallista, asegurando la disponibilidad constante de determinados productos (Muñuzuri, 2016)

El almacenamiento es uno de los procesos de los que se ocupa la logística, es importante exponer el significado de este concepto ya que servirá para entender mejor el significado de almacenamiento. La logística en el ámbito industrial en la actualidad se define como “el conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa, o de un servicio, especialmente de distribución” (RAE). El objetivo de esta es colocar los productos adecuados (bienes y servicios) en el lugar adecuado, en el momento preciso y en las condiciones deseadas, contribuyendo lo máximo posible a la rentabilidad de la empresa. Aunque el almacenamiento no sea la parte más importante dentro de la logística en una empresa, será determinante a la hora de minimizar, por un lado costes de transporte, estableciendo almacenes en lugares óptimos dependiendo de las rutas llevadas a cabo por los transportistas, y por otro lado de tiempo principalmente en horas de operarios, realizando la mejor distribución posible reduciendo así las maniobras dentro del almacén. Actualmente la logística es el único método con el que las empresas pueden diferenciarse del resto de su mismo sector dentro del mercado, debido a la globalización la competencia en cuanto a productos y a calidad en los mismos será muy elevada, por tanto las empresas deben potenciar la calidad del servicio, y ahí es donde entra la logística.

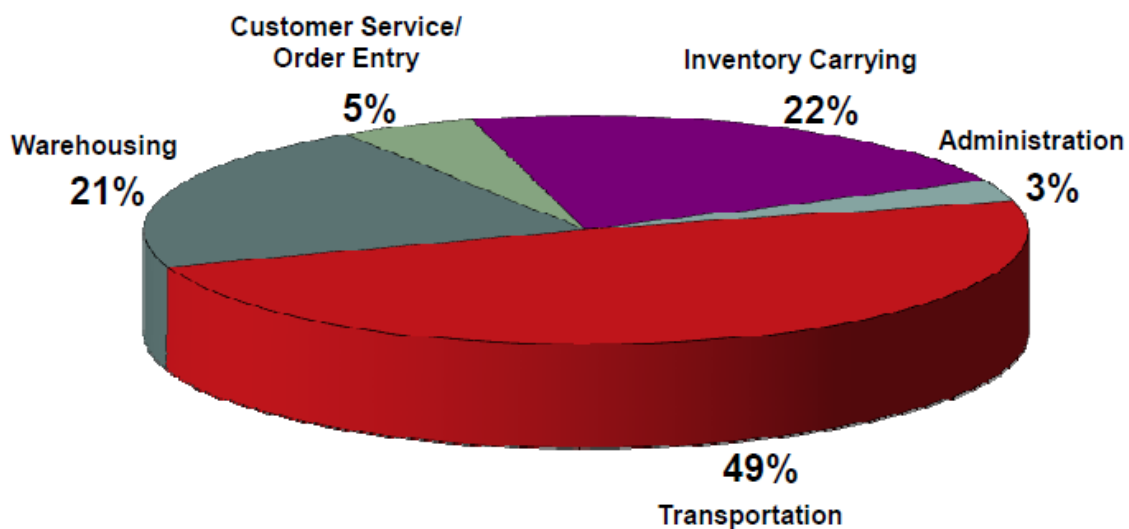
La cadena de suministros estará formada por todas aquellas partes involucradas de manera directa o indirecta en la satisfacción de la solicitud de un cliente. A grandes rasgos la cadena de suministro estará formada por proveedores, manufactura o responsables de la producción, distribuidores, vendedores o minoristas, y consumidores. Dentro de este proceso que se observa en la siguiente imagen se situarían de manera intermedia los almacenes, normalmente situados de manera previa a la producción (almacén de materias primas) y posteriores a esta (almacén de productos terminados). Adicionalmente dependiendo del proceso de distribución se pueden encontrar almacenes intermedios para facilitar la distribución y optimizar las rutas de envío.

En la *Figura 1* se puede observar el orden que llevaría la cadena de suministros dependiendo si el flujo fuera de materiales o de información. Es inmediato que la información viajará desde el consumidor en sentido contrario a la producción y envío de bienes y servicios.



*Figura 1: Esquema cadena de suministros. Fuente: [www.logisticabroz.com](http://www.logisticabroz.com)*

A continuación se observa en la *Figura 2* un gráfico en el que se representa el reparto de costes logísticos dentro de las empresas, donde se ve como se decía anteriormente que el almacenamiento no supone el factor más importante dentro de la logística, pero sigue siendo muy significativo, siendo prácticamente el segundo en importancia.



*Figura 2: Gráfico representativo de costes de logística. Fuente: [www.docplayer.com](http://www.docplayer.com)*

## 2.2 Tipos de almacén

Para poder hacer una correcta clasificación de los tipos de almacenes se han de hacer las siguientes distinciones, según su relación con el flujo de producción, según su grado de mecanización, según su función logística, y según su operación interna.

-Según la relación con el flujo de producción se pueden encontrar almacenes:

- De materias primas: es el encargado de almacenar todas aquellas materias y materiales indispensables para la producción o la comercialización de algún producto en específico.
- De productos intermedios: suelen situarse dentro de la planta de producción, ya que su función principal es la de servir de colchón entre las distintas fases de obtención de un producto. Normalmente suelen tener tiempos mínimos de espera para su utilización.
- De productos terminados: Como su nombre indica son de uso exclusivo para productos terminados. Suele ser el de mayor valor económico por tanto se busca mantener el índice de rotación lo más alto posible.
- De materia auxiliar: dedicado exclusivamente a los materiales auxiliares utilizados en la producción.
- De preparación de pedidos y distribución: su función es acondicionar el producto terminado y ponerlo a disposición del cliente.



Figura 3: Almacén de materias primas. Fuente: [www.dllogistica.com](http://www.dllogistica.com)

-Según su grado de mecanización:

Almacenes convencionales: es el más extendido en casi todos los sectores industriales y se caracteriza por la escasa utilización de mecanismos, el empleo de equipos de tecnología común y la mayor utilización de mano de obra. Usando estanterías convencionales con distintas alturas.

- Almacenes de alta densidad: estos exigen unos medios específicos con el fin de conseguir la mayor densidad posible de bultos ubicados por metro cuadrado de superficie de almacén. Usando estanterías adaptadas al tamaño de las mercancías y pasillos de igual tamaño para máquinas iguales (*Figura 4*).
- Almacenes automáticos: similar al almacén de alta densidad en cuanto a dimensiones de estanterías y pasillos, con la salvedad de que en este caso la ubicación y desubicación de elementos se realiza mediante medios de gestión informáticos que sustituyen a la mano de obra.



*Figura 4: Almacenamiento de alta densidad. Fuente: gaes2desyreci672437.blogspot.es*

-Según su función logística:

Centro de consolidación: estos almacenes reciben productos de múltiples proveedores y los agrupan para servirlos al mismo cliente. Son habituales en industrias con productos cuyos productos tienen una gran cantidad de componentes.

· Centro de ruptura: tienen la función inversa de los anteriores, reciben la carga de un número reducido de proveedores y su función es servir a un gran número de clientes, con diferentes necesidades.

· Centro de tránsito: utilizados para una importante función en la logística como es el cross-docking, proceso que se basa en recibir una mercancía y enviarla lo antes posible en idénticas condiciones. No manipulan, simplemente mueven la mercancía.

· Almacenes cíclicos o estacionales: se trata de almacenes que recogen una producción puntual para hacer frente a una demanda constante, o que permiten resolver demandas puntuales frente a una producción más constante.

· Almacenes de custodia a largo plazo: el único objetivo de estos almacenes es estar lleno, sin preocuparse por costes de transporte, demandas o ritmos de producción. Ya que no tendrán apenas movimiento de mercancías.

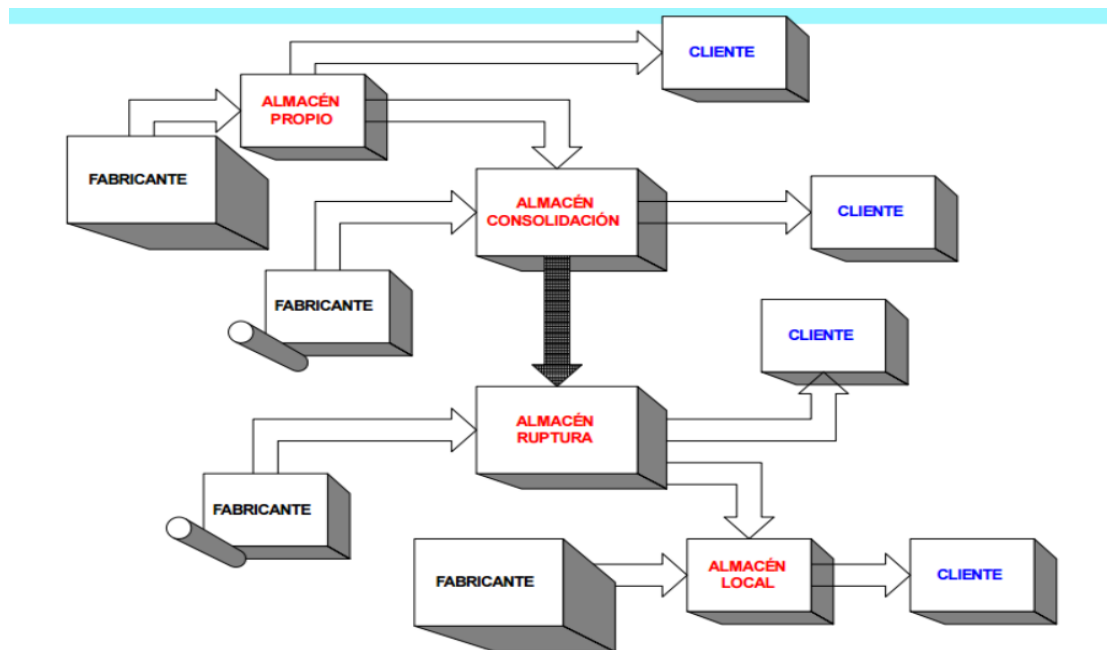


Figura 5: Diagrama de bloques tipos de almacén según función logística. Fuente: (Muñuzuri, 2016)

-Según su operación interna:

Esta clasificación se realizará para las estrategias de preparación de pedidos o picking principalmente.

- Operador a producto: las mercancías tendrán unas ubicaciones fijas y el operario irá recorriendo dichas ubicaciones y cogiendo las cantidades necesarias de cada tipo para cada pedido. Esta estrategia es la q menos inversión requiere y es la más común para producciones no muy elevadas.
- Producto a operador: es muy utilizada en almacenes que tienen un número alto de pedidos se tienen una cantidad importante de referencias y los tiempos que los operarios tienen para la preparación de los pedidos son cortos. En este tipo de preparación de pedidos el operario espera en una estación de picking y es un sistema automático el que trae el producto hasta esta estación, donde el operario extrae la cantidad pertinente, y de nuevo de manera automática se vuelve a almacenar en su lugar.



*Figura 6: Sistema de picking automatizado. Fuente: [www.logismarket.es](http://www.logismarket.es)*

## 2.3 Tipos de estantería o de módulos de almacenamiento

En este apartado se ven las distintas formas de ubicar la mercancía dentro del almacén, centrándose en el bloque o estantería, de la zona de reserva por ejemplo, que es la zona en la que se suelen ubicar la mayoría de las referencias para posteriormente ser transportadas o bien a la zona de picking y preparación de pedidos, o bien a la zona de entrada salida para ser cargado. Si se centra la explicación en esta zona es porque es la zona más común y la que cualquier persona entendería como un almacén convencional.

Se presentan a continuación los siguientes tipos:

### 2.3.1 Almacenamiento en Bloque

En el almacenamiento o almacenaje en bloque las unidades de mercancía o carga se disponen directamente sobre el suelo, apiladas, si es posible en filas y con pasillos para el acceso a cada fila de producto o referencia. Normalmente se intentará que cada fila pallets únicamente contenga pallets de un mismo tipo o referencia para evitar bloqueos, doble manutención, y facilitar el control de inventario.

Se podrán apilar tantas SKU's (Stock Keeping Unit) como la carga permita, por tanto será esencial un buen diseño de la zona de almacén dependiendo de la carga y el espacio que el almacén posea. Este es un factor importante, el espacio, ya que si se dispusiese del espacio suficiente este es el método más barato y flexible de almacenar. Este sistema hace imposible el flujo FIFO de productos, ya que como se ve en la *Figura 7* la primera SKU que se cogería sería la última que llegó (LIFO).



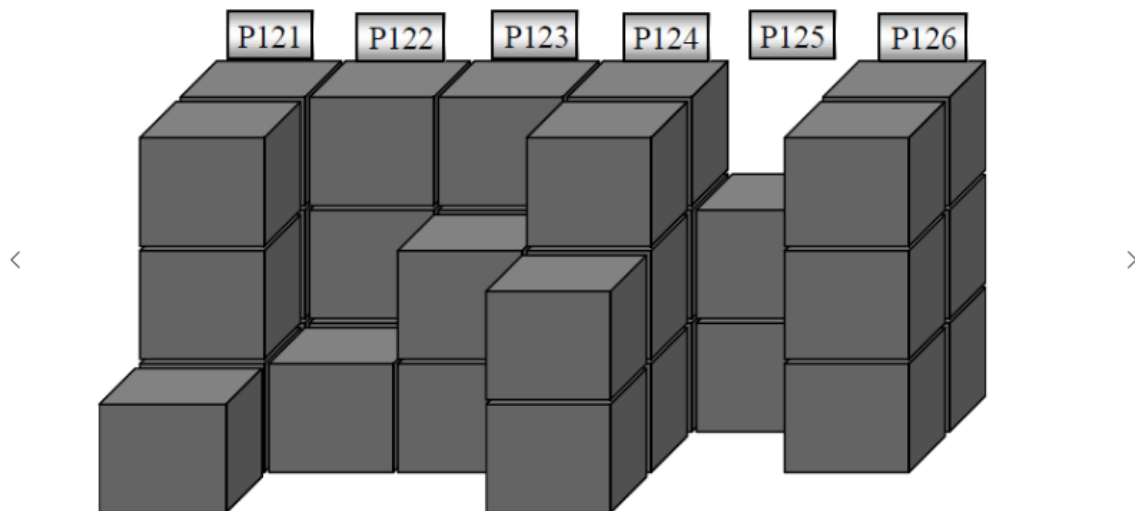


Figura 7: Esquema de almacenamiento en bloque. Fuente: [www.monografias.com](http://www.monografias.com)

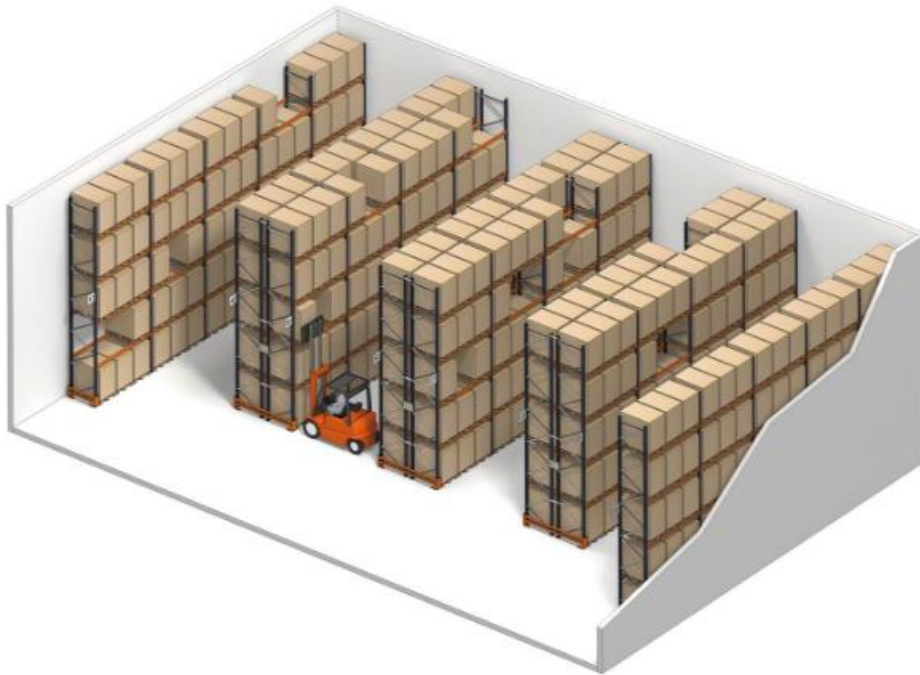
El apilamiento en bloque presenta las ventajas, de que presenta una nula inversión en equipamiento de almacén, supone un uso adecuado de la superficie del almacén y da una buena visión a la hora de llevar el control del stock. Sin embargo tiene una serie de contras como son, el uso inadecuado del volumen debido a la limitación en altura que tiene este método, la dificultad para las máquinas u operarios para el acceso a la carga exceptuando la carga más superficial y con mayor altura (que sería la única que se extraería inmediatamente), y por último la limitación que tiene el apilamiento en altura debido a la necesaria estabilidad y la prevención ante el aplastamiento de las SKU's.

Este método de almacenamiento es adecuado para cargas sin exigencia de rotación, cargas que soporten bien el apilamiento, para almacenes que tengan limitada la altura, y que tengan un número de referencias no muy elevado aunque con un mínimo nivel de stock.

Para llevar a cabo la implantación de este método habría que respetar la anchura de los pasillos necesaria para los mecanismos de manutención que se usarán en el almacén, respetar la exclusividad de la referencia por fila, y no introducir una nueva referencia hasta que la fila no esté completamente vacía, entre otras indicaciones para un correcto funcionamiento.

### 2.3.2 Estanterías convencionales

Este sistema es el más común, es el sistema de almacenaje por excelencia, estos usan el pallet como soporte de la SKU. Las dimensiones de las estanterías vienen determinadas por las medidas de los pallets que soporten las SKU's. Esta solución al problema del almacenamiento es la más simple y utilizada ya que ofrece acceso directo a todas las posiciones o huecos (posición desocupada). Como variable tendrán la altura de la estructura, que dependerá directamente de las dimensiones del edificio o nave industrial, y del equipo de manutención utilizado.



*Figura 8: Reproducción virtual de modelo de estanterías convencionales. Fuente: [www.mecalux.es](http://www.mecalux.es)*

Como se observa en la *Figura 8* las estanterías estarían distribuidas de manera que siempre haya un pasillo accesible a una de las caras de cada SKU, y este pasillo deberá cumplir con los requisitos necesarios para que entre, gire, y trabaje el equipo de manipulación o manutención, tal y como se observa en la imagen.

Este tipo de solución tiene las ventajas de que como se ha dicho permite un acceso directo a cada SKU, no es necesario respetar la exclusividad en una fila ya que podríamos acceder a cualquier referencia aunque se debe respetar un orden a la hora de almacenar, tienen capacidad de adaptarse a todo tipo de cargas (tanto en peso como en volumen), no exige que la carga puede ser apilada, ya que descansa sobre soportes, y permite además realizar una mejor ocupación del volumen por el hecho de que se alcanzan mayores alturas. Pero presenta los inconvenientes de que los operarios ocupados de la preparación de pedidos tendrán que recorrer grandes distancias, y el problema también de que al necesitar un pasillo para cada cara de la carga, se desaprovecha mucho espacio de la superficie y este desperdicio solo puede compensarse con una mayor altura, lo cual no siempre es posible.

El almacenamiento en estanterías convencionales es generalmente recomendable para mercancías en pallets que no posean un número elevado de referencias. Su implementación se basa en respetar la accesibilidad con un pasillo a todas las SKU's, y la anchura de los pasillos y la altura de las estructuras estarán como ya se citó anteriormente directamente relacionadas con las características de los equipos de manutención.

### **2.3.3 Estanterías dobles**

Serían una variación del caso anterior, con la que conseguiríamos un mejor aprovechamiento del espacio en almacén, añadiendo una doble profundidad a cada fila, por tanto desde cada pasillo se tendría que acceder a una referencia exterior y a otra interior, desde la misma posición de la máquina de extracción. La diferencia con el caso anterior es que nos haría falta un ancho de pasillo mayor que para la estantería convencional.

Por tanto esta opción aumentaría todas las ventajas anteriormente citadas añadiendo además el hecho de que se aumentaría en gran medida el porcentaje de espacio de almacenamiento utilizado. Pero tendría el inconveniente añadido de que se reduciría la accesibilidad. La capacidad de almacenar en varias alturas de este método dependería al igual que anteriormente de la capacidad elevadora de la maquinaria, contando con que además de elevarse una cierta altura debe hacerlo totalmente extendida, para el caso en el que extrajera la caja

situada en el nivel superior y en la posición menos superficial.

El resto de características serían redundantes respecto a las del apartado anterior, en la siguiente imagen se observa una estantería doble, se puede apreciar que el operario tendría que acceder a dos niveles de profundidad y varios de altura desde la misma posición del pasillo.



Figura 9: Almacén con estanterías de doble profundidad. Fuente: (Muñuzuri, 2016)

### 2.3.4 Estanterías compactas

Un método que favorece aún más el aprovechamiento del espacio de almacenamiento sería el de los módulos de estanterías compactas. Se trata de estanterías que permiten el paso de las carretillas a través de las filas para llegar a un nivel de profundidad mayor del que se podría acceder desde el pasillo. En este caso las cargas recaerían sobre largueros en vez de sobre estantes, es de esta forma para permitir el acceso de las carretillas.

Dentro de este tipo de estanterías podríamos hablar de estanterías que permiten entrar hasta el último nivel de profundidad, y posteriormente la carretilla saldría en la misma dirección pero en sentido contrario después de haber depositado la carga o cargado la mercancía, este caso sería el conocido como “Drive-in”. Y por otro lado estaría la opción de que las carretillas atravesaran la fila y pudieran acceder y salir por ambos lados de la fila, este método es conocido como “Drive-through”. La diferencia entre ambos erradicaría en que la primera opción tan solo requiere un pasillo mientras que en el segundo harían falta dos.

Los sistemas compactos presentan ventajas como, un mayor aprovechamiento de la superficie y del volumen, se minimizan los pasillos de servicio (Ahorro de un 94% frente al sistema convencional) y ahorro en el coste en carretillas elevadoras y en mantenimiento en general. Por el contrario presenta inconvenientes como que imposibilita establecer clasificaciones o caducidades, presenta una baja flexibilidad, imposibilita un uso continuo de la superficie de almacenaje y supone un gran peligro de dañar las cargas al maniobrar dentro de las estanterías.

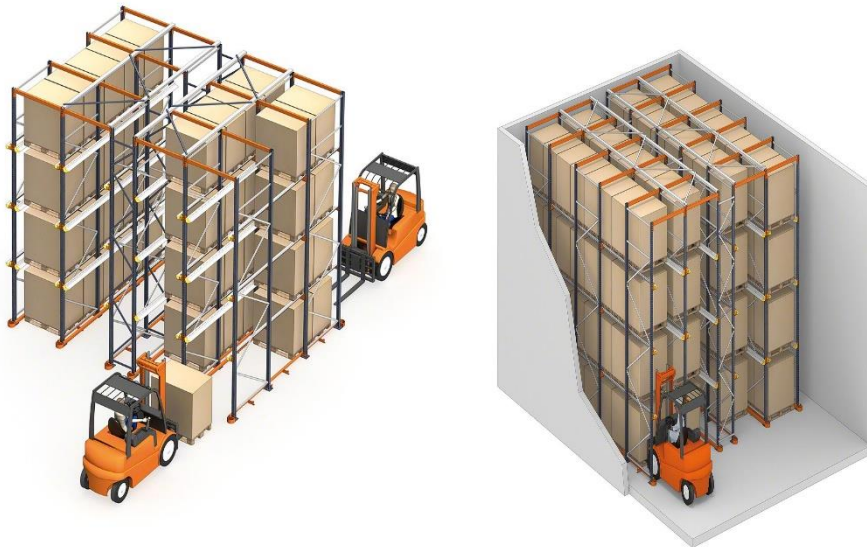


Figura 10: "Drive-through". Fuente: [www.mecalux.es](http://www.mecalux.es)/ Figura 11: "Drive-in". Fuente: [www.mecalux.es](http://www.mecalux.es)

Estos sistemas de almacenamiento suelen usarse, o es recomendable que se usen, cuando no hay demasiada variedad de rotaciones en las referencias, referencias de productos no perecederos en el tiempo con un elevado inventario de estas, y mercancías homogéneas.

Dentro de este grupo de estanterías compactas se puede hablar de estanterías compactas de tipo push-back, caracterizadas porque las cargas se realizan por un único lado del bloque, pero las cargas se irían empujando entre ellas como se observa en la siguiente figura. La descarga se realizaría también por el mismo extremo que la carga, y únicamente tendríamos una SKU en el extremo contrario en el caso de que la fila estuviera completamente llena.

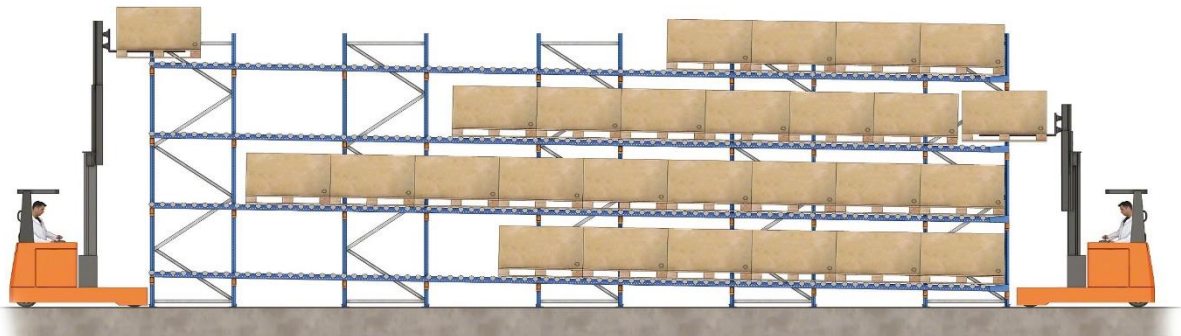


Figura 12: estanterías push-back. Fuente: (Muñuzuri, 2016)

### 2.3.5 Estanterías dinámicas

De manera parecida al modelo compacto, el objetivo principal de estos tipos de estantería es aumentar el uso del espacio, pero a diferencia de las estanterías compactas, las de este tipo garantizan el flujo FIFO de las SKU's. El funcionamiento se basa en que las cajas o pallets se depositan sobre rodillos o roldanas en una estructura de metal de grandes dimensiones. Las cajas irían deslizándose hacia la salida desde el punto de carga. Por tanto este modelo es mucho más cómodo por el hecho de que la carga se realiza siempre por el mismo extremo del bloque.

A continuación se muestra en la *Figura 13* como sería el funcionamiento de este sistema



*Figura 13: Representación estantería dinámica. Fuente: [www.mecalux.es](http://www.mecalux.es)*

Estas estanterías presentan las ventajas ya comentadas respecto al aprovechamiento de espacio y garantiza el flujo FIFO. Y además se reduce el tiempo de pedidos porque se reduce el espacio recorrido, se reducen también los tiempos de descarga de camiones y de reposición, reduce la congestión separando los pasillos de reposición de los pasillos de picking. Por otro lado existen algunos inconvenientes como el elevado coste, la gran densidad de materiales por unidad de volumen, riesgo de que las SKU's resulten aplastadas, normalmente no será necesario todo el volumen disponible para algunas referencias.

Estas estanterías son útiles para productos con exigencias de flujo FIFO, para almacenamiento de cajas utilizado en procesos de preparación de pedidos o para alimentar líneas de montaje.

Para un correcto uso de estos módulos es necesario realizar un diseño adecuado acorde a las características de las SKU's de los carriles, con sus protecciones, del sistema de frenado, y de los rodillos de deslizamiento.

### 2.3.6 Estanterías móviles

Los módulos de estanterías móviles son idénticos a las estanterías convencionales con la salvedad de que las que en este subapartado nos ocupan en vez de estar ancladas al suelo, descansan sobre unos raíles. Así las estanterías se moverán y en cada instante dependiendo de la posición de estas se generará el pasillo en un lugar o en otro. Estos módulos pueden manipularse manual o mecánicamente.

Tienen la ventaja de que reduce el espacio destinado a pasillos al mínimo, permitiendo además el acceso individual a cada uno de los pasillos. Pero tendrán la desventaja del elevado coste que supone, la dificultad del control de los inventarios, tan solo se puede acceder a un pasillo por unidad de tiempo.

Sistema recomendado para productos de baja rotación, y relativamente ligeros, por ello es habitual que se usen más para documentos y no para productos almacenados en pallets.

En la *Figura 14* se observa el esquema del funcionamiento de los módulos móviles.



*Figura 14: Estanterías móviles. Fuente: [www.mecalux.es](http://www.mecalux.es)*

### 2.3.7 Almacenes rotativos

Los almacenes rotativos son del tipo producto-a-operador, el sistema de almacenamiento será el que se mueva hacia el operador. Existen principalmente dos clasificaciones, los horizontales (carruseles), y los verticales, que podrán ser a su vez torres de extracción o paternóster.



*Figura 15a: Almacén paternóster. Fuente: [www.logitecsl.net](http://www.logitecsl.net) /Figura 15b: torre de extracción. Fuente: [www.tsf-info.net](http://www.tsf-info.net)*



*Figura 15c: Almacén tipo carrusel. Fuente: [www.monografias.com](http://www.monografias.com)*

En la *Figura 15* se puede apreciar la apariencia exterior de los tres tipos citados de almacenes rotativos, todos tienen las características generales comunes, lo que cambia son algunos detalles del funcionamiento, por ejemplo en el paternóster son las estanterías las que van girando, en las torres de extracción sería un transelevador el que acercaría el producto al operario, en los carruseles serían las cestas o cajas con los productos las que se moverían a través de una cadena sin fin.

Los almacenes de este tipo presentan ventajas como la simplificación del picking, la protección del producto de posibles agresiones, un perfecto control del stock y un uso apropiado del espacio. Pero surgen algunos inconvenientes como el elevado coste que suponen o la exigencia de sistemas de información con una gran fiabilidad.

Este método es recomendable para mercancías o productos homogéneos, con un número considerable de referencias, y en empresas con unas exigencias de pedidos complejos. En estos sistemas toma una gran importancia el software, ya que gestiona la salida y ubicación de los productos. Dependiendo de los niveles esperados en la salida de productos se deberá asignar varios o un solo carrusel por operario. Cuanto mayor sea la longitud del carrusel mayor será el coste en tiempo, por el giro de este.

### **2.3.8 Almacenes automáticos**

Son módulos en los que un sistema informático controla e integra los elementos de manutención y de almacenamiento. Suelen tener una gran altura, y dependiendo del tamaño de la carga que almacenen se puede hablar de dos variantes. Para cargas grandes como pallets o mayores se usarán ASRS, pueden superar los treinta y cinco metros de altura, suelen ser estructuras autoportantes, lo que implica que las cargas y el edificio tienen el mismo soporte. Para estos almacenes toma mucha importancia una nivelación del suelo ya que podría suponer un problema al aumentar la altura para el sistema informático. Si las cargas son pequeñas se usan miniloads, que suelen tener más de doce metros de altura.

El funcionamiento de ambos es parecido, un transelevador llevaría la mercancía a su lugar correspondiente, y cuando quisiéramos extraer una carga, el ordenador lanzaría la orden y mandaría al transelevador a realizar la recogida. Los almacenes automáticos tienen la ventaja de que optimizan el uso del suelo, controlan de manera exacta el stock y se da una reducción importante del número de operarios necesarios. También suelen presentar inconvenientes como una inversión inicial muy elevada, la necesidad de un sistema informático muy potente y unos costes de mantenimiento muy elevados, ya que el éxito de este sistema depende exclusivamente del correcto funcionamiento del proceso automático.

Se recomiendan los almacenes ASRS para empresas con una gran variedad de referencias, con mucha rotación de estas, que trabajen artículos en pallets o en unidades de almacenamiento mayores, donde se exijan alturas de almacenamiento elevadas. Los almacenes miniload serán útiles para artículos con un volumen pequeño pero con numerosas referencias. Existe un criterio matemático para el diseño de este tipo de almacenes pero no se expondrá en este trabajo, ya que se expone este tipo de almacén a modo de introducción.

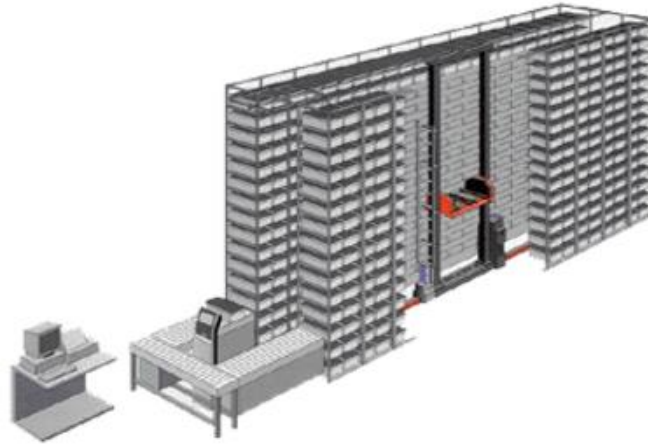


Figura 16: Almacén ASRS. Fuente: [www.ing.ula.ve](http://www.ing.ula.ve)

### 2.3.9 Almacenes especiales

Por último, se puede hacer una última clasificación para los almacenes para productos especiales, cuando estos no pueden almacenarse en pallets y habrá que adaptar o fabricar soportes para que se puedan usar con estos artículos. A modo de ejemplo se pueden encontrar estructuras especiales para objetos largos. En la *Figura 17* se observa la apariencia que tendría un almacén de este tipo de materiales. Habrá tanta variedad en las especificaciones de las medidas de las estructuras como productos especiales que se salgan de los cánones establecidos como normales existan.



Figura 17: Almacén especial productos largos. Fuente: [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)



## 2.4 Tipos de elementos de manejo de materiales

Este punto es importante porque se relaciona directamente con el tipo de almacén y de estantería. Puede verse cómo que los elementos de manejo deberán cumplir unas especificaciones dependiendo del tipo de estantería y del almacén con el que se vayan a encontrar, lo cual viene definido por el tipo de material con el que se trabaje en este. Como se ha visto en puntos anteriores dependiendo del material y las condiciones requeridas por la empresa para cumplir con los pedidos de sus clientes, se diseñará un tipo de almacén u otro.

A continuación se realiza una clasificación de los elementos manipuladores en función de diferentes casos.

### 2.4.1 Elementos de manipulación que mueven sin trasladarse

Dentro de este grupo se encuentran los elementos capaces de transportar mercancía o carga, sin necesidad de desplazarse ellos mismos. Este grupo engloba a las cintas transportadoras, las electro-vías y los puentes grúa.

- Cintas transportadoras: “Las cintas transportadoras son elementos auxiliares de las instalaciones, cuya misión es transportar, elevar o distribuir materiales hacia otro punto. Son aparatos que funcionan solos, intercalados en las líneas de proceso y que no requieren generalmente de ningún operario que las manipule directamente de forma continuada. Las cintas transportadoras sirven para el transporte horizontal o inclinado de objetos sólidos o material a granel” (Salinero, 2013).

- Electro-vías: “Se trata de unos elementos de transporte automatizado que presentan una gran versatilidad y capacidad de adaptación siempre que se requiera emprender un cambio en el diseño de la planta. La electro-vía se usa en el entorno de la producción industrial para trabajos tan variados como el transporte de vehículos a lo largo de una cadena de montaje o el desplazamiento de materiales dentro de una fábrica.” (Mecalux News, 2007).

- Puentes grúa: “Los puentes-grúa son máquinas utilizadas para la elevación y transporte, en el ámbito de su campo de acción, de materiales generalmente en procesos de almacenamiento o curso de fabricación. La máquina propiamente dicha está compuesta generalmente por una doble estructura rematada en dos testeros automotores sincronizados dotados de ruedas con doble pestaña para su encarrilamiento. Apoyado en dicha estructura y con capacidad para discurrir encarrilado a lo largo de la misma, un carro automotor soporta un polipasto cuyo cableado de izamiento se descuelga entre ambas partes de la estructura (también puede ser mono-raíl con estructura simple). La combinación de movimientos de estructura y carro permite actuar sobre cualquier punto de una superficie delimitada por la longitud de los raíles por los que se desplazan los testeros y por la separación entre ellos” (Salguero, 2015).



Figura 18: Puente grúa. Fuente: [www.hellopro.es](http://www.hellopro.es)

#### 2.4.2 Elementos de manipulación que mueven y se trasladan

Este grupo es el que englobe la mayoría de maquinaria con la que usualmente se trabaja en los almacenes cotidianos. Se encuentran englobados en este mismo grupo la transpaleta, el apilador, las carretillas (contrapesadas, retráctiles, o trilaterales), los transelevadores y los vehículos guiados. Todos se caracterizan porque pueden transportar carga y además tienen la capacidad de moverse.

- Transpaleta: puede ser manual o eléctrica, “La transpaleta manual es un tipo de carretilla manual que constituye un equipo básico, por su sencillez y eficacia, y que tiene un uso generalizado en la manutención y traslado horizontal de cargas unitarias sobre pallets, desde los lugares de operación - generalmente las máquinas- a los lugares de almacenamiento o viceversa. La transpaleta manual es una carretilla de pequeño recorrido de elevación, trasladable a brazo, equipada con una horquilla formada por dos brazos paralelos horizontales unidos sólidamente a un cabezal vertical provisto de ruedas en tres puntos de apoyo sobre el suelo y que puede levantar y transportar pallets o recipientes especialmente concebidos para este uso” (Tamborero, 2015).

“La transpaleta eléctrica, es un equipo autopropulsado de tracción eléctrica, de corto recorrido de elevación, equipada con una horquilla formada por dos brazos portantes, que pueden elevarse mediante un mecanismo electro hidráulico, apta para el transporte horizontal de mercancía paletizada” (Consebro, 2008).

- Apilador: Puede ser también manual o eléctrico, se trata de un elemento de manutención parecido a la transpaleta que además posee un mecanismo que permite elevar a una cierta altura las pinzas. Puede soportar una carga de aproximadamente 1500 kilogramos y en el caso más favorable puede alcanzar una altura de 3.6 metros (Alegre, 2013).

- Carretillas contrapesadas: la característica diferenciadora de esta carretilla es su capacidad para elevar grandes cargas, debido a un contrapeso que posee en su parte posterior. Como dato negativo, estas carretillas tienen limitada su capacidad elevadora, y suelen llegar normalmente hasta unos cinco o seis metros de altura como máximo (Urzelai, 2006).

- Carretillas retráctiles: son elementos que permiten variar el centro de gravedad de la carga, esto permite que se reduzca la anchura de los pasillos debido a la mayor maniobrabilidad de esta (Alegre, 2013). Existen muchos modelos con diferentes características pero un modelo común en la industria puede soportar a partir de unos mil kilogramos y alcanzar con las horquillas una altura de diez metros aproximadamente.

- Carretillas trilaterales: son aquellas que tienen como diferencia de las otras carretillas, que poseen un eje vertical sobre el que las horquillas pueden girar, por tanto el pallet o la carga podría girar lateralmente por delante de la carretilla, y tendría las mismas condiciones de elevación que la retráctil (Alegre, 2013).
- Transelevadores: estos equipos de almacenamiento permiten transportar cargas por pasillos muy estrechos, por donde no cabrían las carretillas, alcanzando además muy altas velocidades. Existe la variante de que lo maneje un conductor o bien que sea guiado por un microprocesador. Manejan pallets completos (Alegre, 2013).
- Vehículos guiados: estos vehículos también son conocidos como AGV, se muestra un ejemplo en la *Figura 19* “Un sistema de vehículos guiados automáticamente es una batería de vehículos con capacidades de programación de destino, selección de trayectoria y posicionamiento. El sistema AGV pertenece a una clase de sistemas de manejo de materiales la cual se caracteriza por ser altamente flexible, inteligente y versátil que se utiliza para transportar materiales desde diversos puntos de carga a lo largo de las instalaciones de una planta o entorno” (Echeverri, 2012).

Técnicas habituales son, el autoguiado óptico, utiliza un camino marcado en el suelo por medio de una raya ayudándose de sensores para seguir este. El autoguiado por identificación de posición, comparando el camino a recorrer con el esquema de posiciones memorizado, valiéndose de un detector para hacerlo. Y la navegación inercial, que utiliza la medida de las aceleraciones tanto traslacionales como rotacionales del mismo vehículo y calcula la posición relativa respecto a un punto integrando ambos parámetros (Muñuzuri, 2016).



*Figura 19: Sistema AGV's. Fuente: [www.egeminusa.com](http://www.egeminusa.com)*

En la *Figura 20* se puede observar una gráfica que representa el tipo de equipo de manejo de material en almacén, en función de las unidades movidas por hora y la distancia de recorrido en metros. Se puede ver que para un gran número de unidades movidas se utilizarán las cintas transportadoras, mientras no se llegue a una excesiva distancia de recorrido, motivo por el cual se dejarían de usar cintas transportadoras y se comenzarían a usar vehículos de tracción motorizada o AGV's. Para un nivel inferior de unidades movidas por hora se utilizarán en orden creciente de distancia de recorrido, tracción manual, transpaleta, carretillas y AGV's.

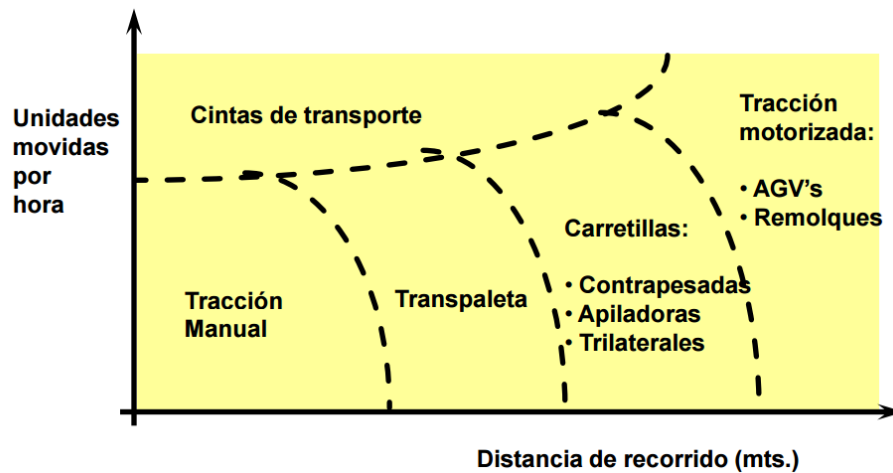


Figura 20: Gráfica para el uso de elementos de manutención. Fuente: (Muñuzuri, 2016)

## 2.5 Distribución almacén

El “layout” o distribución en planta de un almacén dependerá del tipo que sea este, cada tipo tendrá unas zonas determinadas acorde a sus necesidades. Como el objeto de este trabajo no es el diseño ni la correcta elección de un almacén, se expondrán en este apartado las características de las diferentes zonas que puedan existir (Muñuzuri, 2016).

- Zona de entrada y salida (E/S): siempre habrá zona de E/S en un almacén, como su nombre indica es la zona por la que entraran las carretillas o elementos de manutención que descargan los camiones, y por donde saldrán las mismas carretillas para cargar los camiones con la carga. La diferencia entre unos almacenes y otros la marca la distribución de la entrada y salida en función del volumen de llegadas y de salidas para evitar el entorpecimiento entre salida y entrada.
- Dársenas para camiones: las habrá de varios tipos dependiendo de las condiciones de los camiones y del almacén. Normalmente estarán cerca de las zonas de E/S para facilitar la labor de los operarios.
- Zona de reserva: esta zona es la utilizada para almacenar los productos durante un tiempo determinado, y tendrá que albergar espacio tanto para las estanterías, como para los pasillos y accesos necesarios para la maquinaria de manutención. El diseño de esta zona será crucial para la optimización del espacio de almacenamiento y ayudará a la empresa a disminuir costes, como por ejemplo disminuyendo la distancia media recorrida por las carretillas (Iglesias, 2015).
- Zona de picking: esta zona es en la que las labores están destinadas a recuperar los elementos almacenados y a su preparación para entregar los pedidos a los clientes. Estos procesos se pueden hacer por selección individual, por rutas de recogida o asignando a cada trabajador una zona y realizando este uno o una combinación de los dos métodos anteriores (Iglesias, 2015).

# 3 MÉTODOS DE APILAMIENTO EN BLOQUE

---

Este capítulo trata algunos ejemplos de métodos de apilamiento en bloque, con ellos se aporta una justificación y explicación sobre como funciona cada uno, además de una revisión bibliográfica en la que se presentan el conjunto de fuentes de información utilizadas para llevar a cabo la recopilación de datos acerca de cada método.

Como se ha explicado en anteriores capítulos y apartados dentro de los tipos de almacenes y de las formas o métodos para almacenar, el apilamiento en bloque es uno de estos. Se caracteriza porque busca ocupar de la forma más eficiente posible el volumen de almacén, trabaja apilando cargas una encima de otra y en algunos casos, trabajando en profundidad, que como se ha podido ver en la introducción de este trabajo dependerá básicamente del material del que dispongamos y si nos permite o no hacerlo.

Optimizar el almacenaje o apilamiento de las cargas aunque no parezca demasiado influyente, es una fuente de minimización de costes para las empresas, tanto en tiempo ahorrado en operarios que pueden dedicar a otras tareas que reporten beneficio a la empresa, como en costes de inventario, que evidentemente serán reducidos en importe y además una reducción del espacio necesario.

## 3.1 Método de almacenamiento de alta densidad

Este método pretende resolver el problema de grandes empresas que se ven obligadas a instalar almacenes en zonas urbanas o zonas privilegiadas, lo que implica que tengan que adquirir superficies más pequeñas para sus almacenes y por lo que optimizar el uso del espacio en estas situaciones puede significar mucho beneficio, o mucho ahorro en cuanto a costes, para las empresas.

Algunos intentos de mejorar el almacenamiento en bloque han dado lugar a sistemas que han ido resolviendo una serie inconvenientes. Algunos profesionales en estudios relacionados afirmaron que la mejor forma de mejorar la utilización del espacio era trabajar con pasillos estrechos (NA), o con pasillos muy estrechos (VNA). Evidentemente el espacio dedicado al almacenamiento aumentaba considerablemente, pero surgía el problema de las congestiones a la hora de trabajar en el almacén y conllevaba incrementos en el coste de los movimientos de operarios ya que los pasillos al ser estrechos tenían un único sentido. Otra idea fue trabajar con la profundidad, proponiendo que cada carril o línea trabajara con la misma SKU para evitar tener que desplazar una carga para poder acceder a otra. Para incrementar la densidad del almacenamiento, algunas veces ponían carriles de pallets de una misma SKU con varios pallets de profundidad e incluso hasta cuatro de altura, formando así un área de almacenamiento en bloque. Este tipo de almacenamiento era mucho más denso que los que optaban por uno o dos niveles de profundidad, pero tenía el inconveniente de que de que se producía el ya conocido “honeycombing”, cada vez que se ocupaba una posición dentro de una línea este carril solo podría recibir pallets de la misma SKU ya que si no, quedarían bloqueadas algunas posiciones (Heragu, 1997).

Se llega a la conclusión de que realmente los denominados sistemas de almacenamiento de alta densidad, serán aquellos en los que exista la posibilidad de que un operario tenga que mover algún pallet de otra posición para así poder acceder a la carga buscada. Por tanto los sistemas que tengan a partir de dos niveles de profundidad y las áreas de almacenamiento en bloque si serán sistemas de alta densidad. Sin embargo un sistema con un único nivel de profundidad no será de este tipo ya que los operarios podrán acceder a todas las posiciones desde los pasillos.

Durate mucho tiempo se ha estudiado la disposición de los pasillos y las estanterías en almacenes

rectangulares, pero no se ha abordado el objetivo de maximizar la densidad. Algunos autores se han centrado en minimizar los costes de la mano de obra, sabiendo que es el coste más significativo dentro de los costes operativos (Frazelle, 2002). Heragu (1997) describió como determinar la anchura y el largo de un almacén rectangular, para minimizar así el recorrido de los operarios. Antes, Bassan (1980) comparó cuatro configuraciones diferentes dentro de un almacén rectangular, dos de ellas colocaban las estanterías paralelas al lado largo del almacén, y las otras dos las colocaban perpendiculares a éste. Para analizar cuál era el mejor método se basaron en las distancias recorridas y descubrieron que minimizándolas aumentaban el rendimiento de los trabajadores ya que realizaban más pasadas o viajes en el mismo tiempo.

Kim y Park (2003) estudiaron como asignar espacios de almacenamiento temporal para contenedores en proceso de salida, para reducir costes de manipulación y mejorar el rendimiento.

Después de recopilar información procedente de la bibliografía comentada anteriormente se ha llegado a la conclusión de que para explicar el método de almacenamiento de alta densidad se va a usar el algoritmo propuesto por Kevin R. Gue (2005). En el siguiente subapartado se describe el método de almacenamiento de alta densidad.

### 3.1.1 Maximización de la densidad de almacenamiento. Algoritmo

Para explicar este método de diseño de almacenamiento se va a tomar un sistema abstracto. El espacio de almacenamiento estará dividido como una cuadrícula de manera que todas las posiciones sean iguales. Y cada posición podrá representar un hueco lleno o destinado a almacenamiento, o una posición destinada a pasillos para el manejo de materiales ya sea manual o automático.

Se partirá de una región rectangular, con dimensiones de  $j \times i$ , donde  $j \leq i$ . Habrá una manera de transportar los elementos desde sus posiciones habituales hasta las celdas no ocupadas. Se supondrá que este transporte se hará en el mismo plano que el de los elementos almacenados, por tanto deberá moverse a través de posiciones no ocupadas (pasillos).

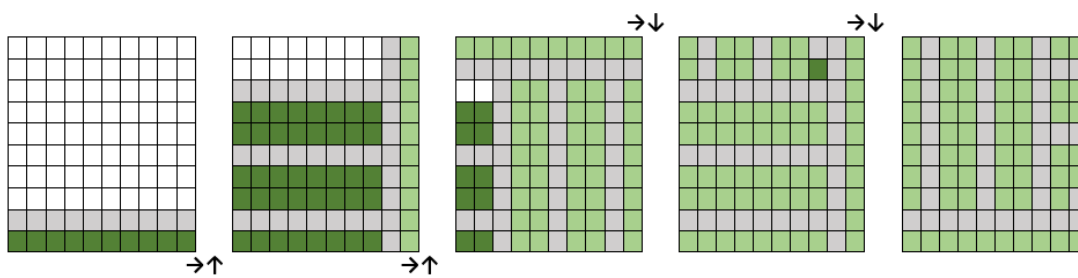
La cuadrícula citada representará un espacio cerrado con una única posición de entrada y salida, que estará situado en los límites de la cuadrícula. Por consiguiente los pasillos que componen la red deben estar conectados con el punto de E/S, además los elementos situados en los límites exteriores no podrán ser extraídos desde una posición distinta a la de E/S, por tanto no se podrán extraer elementos desde el exterior de la cuadrícula.

Para este método se asume que las dimensiones de los huecos utilizados para almacenamiento y los destinados para pasillos serán del mismo tamaño. Esto parece coherente, pero hay casos en los que es necesario que las posiciones de pasillos sean de mayor anchura debido a la necesidad de espacio para maniobrar de la maquinaria de extracción. Como se ha dicho en este método se trabajará con la misma dimensión para posiciones de elementos y para pasillos.

En adelante se verá el algoritmo en términos generales, por ejemplo para una profundidad de carril  $K$ , lo cual hace que la situación cambie relativamente. Si la profundidad es de un solo pallet todas las posiciones serán accesibles desde los pasillos, si se tienen dos pallets de profundidad cualquier posición será accesible moviendo no más de un pallet adicional al que se desea extraer. Técnicamente por tanto el caso de una profundidad unitaria ( $k=1$ ) no pertenecería al almacenamiento de alta densidad, pero aun así se ha decidido incluir un ejemplo como se verá más adelante, como un caso base muy común en la realidad. A continuación se procede a explicar el algoritmo de OCUPACIÓN-Y-ROTACIÓN:

- Para una cuadrícula  $j \times i$ , ocupar las posiciones situadas en las  $K$  filas partiendo de la parte inferior de la cuadrícula y marcar la siguiente fila como posiciones destinadas a pasillos. Rotar en sentido contrario a las agujas del reloj.
- Comenzando por la parte inferior de la cuadrícula en la posición actual, ocupar las  $k$  filas como posiciones para carga y marcar la siguiente como un pasillo, luego ocupar  $2k$  filas para almacenamiento y marcar la siguiente para pasillo repetidamente hasta que resulte una distribución no válida (esto ocurre si hay  $[k + 1, 2k]$  filas restantes sin marcar). Si no hay filas sin marcar, FIN; en otro caso rotar en sentido contrario a las agujas del reloj la cuadrícula.
- Comenzando de nuevo por la parte inferior, siempre de la cuadrícula en la posición actualizada, ocupar con posiciones de almacenamiento las  $k$  filas de la sección restante sin marcar; luego marcar una fila para pasillo y ocupar para posiciones de elementos de carga  $2k$  filas repetidamente hasta que queden menos de  $2k + 1$  filas sin marcar.
- Si hay más de  $k$  filas restantes sin marcar, marcar una fila para pasillo, ocupar las filas restantes para posicionamiento de carga, y FIN. En otro caso, rotar la cuadrícula en el sentido de las agujas del reloj.
- Ocupar las  $k$  filas de la parte inferior, de la sección restante sin marcar, para almacenamiento y marcar una fila para pasillo. Si todas las celdas están ocupadas o marcadas, FIN; en otro caso rotar la cuadrícula en el sentido de las agujas del reloj.
- Ocupar las filas restantes desde la posición inferior de la sección restante sin marcar, dejando siempre un pasillo en la parte superior de dicha sección; FIN.

En la *Figura 21* se muestra un ejemplo que puede servir para entender de mejor manera el algoritmo, en esta se ve de forma gráfica como se va realizando la ocupación del espacio hasta completar la cuadrícula al completo. Aunque se ha dicho que no es del todo acertado considerar los sistemas de profundidad unitaria ( $k = 1$ ) como de alta densidad, se ha utilizado este caso para comprender el funcionamiento del algoritmo.



*Figura 21: Representación gráfica algoritmo de almacenamiento de alta densidad. Fuente: creación propia.*

La *Figura 21* se ha realizado de manera que se observe de izquierda a derecha de manera cronológica como se irían ocupando y marcando las zonas del almacén a diseñar. Se ha elegido un color verde oscuro para identificar las zonas que se ocupan para almacenamiento en ese paso, con color gris se han marcado las posiciones que quedarían destinadas a pasillos, y en color verde claro aparecen las posiciones que pertenecerían a almacenamiento pero que se habrían ocupado en pasos anteriores.

A continuación se presenta la formulación del algoritmo formal para el método de OCUPACIÓN-Y-ROTACIÓN:

- Se parte de una cuadrícula de  $j \times i$  y se necesita coeficiente de densidad que será  $k$  (profundidad).
- Asegurarse de que la cuadrícula está situada con la parte de longitud  $i$  de la cuadrícula de manera paralela al eje de abscisas.

#### ALGORITMO DE OCUPACIÓN-Y-ROTACIÓN

- Asignar  $K$  filas para almacenamiento desde la parte inferior, y marcar una fila de pasillo;  $e1 \leftarrow i$ .
- Asignar  $k$  filas para almacenamiento desde la parte inferior y marcar un pasillo;  $e1 \leftarrow e1 - (k + 1)$ .
- **while**  $e1 \geq 2k + 1$  **do**
- Asignar  $2k$  filas y marcar una fila como pasillo;  $e1 \leftarrow e1 - (2k + 1)$ .
- **end while**
- **if**  $e1 \leq k$  **then**
- Asignar  $e1$  filas para almacenamiento y FIN.
- **else**  $\{k < e1 \leq 2k\}$
- Rotar la cuadrícula en sentido contrario a las agujas del reloj;  $e2 \leftarrow m - (k + 1)$
- Asignar  $k$  filas para almacenamiento;  $e2 \leftarrow e2 - k$
- **while**  $e2 > 2k + 1$  **do**
- Marcar una fila de pasillo y asignar  $2k$  filas para almacenamiento;  $e2 \leftarrow e2 - (2k + 1)$
- **end while**
- **if**  $e2 > k$  **then**
- Marcar una fila para pasillo, asignar  $e2 - 1$  filas, y FIN.
- **else**  $\{e2 \leq k\}$
- Rotar la cuadrícula en sentido horario
- Asignar  $k$  filas de anchura  $e2$  y marcar un pasillo
- **if**  $e2 > 1$  **then**
- Asignar  $e2 - 1$  filas para almacenamiento y marcar un pasillo, FIN.
- **end if**
- **end if**
- **end if**

Figura 22: Algoritmo de Ocupación-Rotación. Fuente: (Kevin R. Gue, 2005)

En este apartado se ha presentado un método concreto para el cálculo de la distribución de un almacén que busca maximizar la densidad de almacenamiento. Solo se ha tratado la distribución y la manera de efectuarla. Este trabajo busca exponer diferentes formas de diseñar almacenes, y en este caso se ha observado que este método es muy útil para empresas que necesiten una gran densidad. Aunque como todos los modelos este también tendría sus límites, concretamente un sistema de profundidad unitaria únicamente llegaría a obtener una densidad de  $2/3$ , mientras que uno de doble profundidad podría llegar a un máximo de densidad de  $4/5$  (Kevin. R, 2005). Por tanto este método sería adecuado siempre que no se buscara una densidad superior al límite para cada caso.



## 3.2 Método de almacenamiento en altura

Se presenta en este apartado otro método de almacenamiento o de apilamiento de unidades de carga en bloques. En este caso el apilamiento se realizará en vertical con lo cual es evidente que surgirán problemas cuando existan cargas sobre de la unidad que se desea extraer, y haya que realizar movimientos de relocalización. Minimizarlos será el objetivo de este método, en adelante se expondrán los distintos casos que podrán presentarse. La relocalización o reubicación es una gran fuente de ineficiencia ya que ralentiza en demasía las operaciones de manejo dentro de un sistema de apilamiento en bloque. Se pueden dar dos escenarios, que se posea información sobre el tipo de carga (para poder ubicarla de manera óptima) o que no se tenga dicha información. Para el caso de no poseer información se realiza un cálculo estadístico que da el número esperado de reubicaciones. Y para el caso en que se posee esta información se propone un método basado en un algoritmo genético que determina la ubicación de cada unidad de carga minimizando el número de relocalizaciones. Estos problemas surgen cuando no hay suficiente espacio de almacenamiento como para separar cada referencia en una zona de apilamiento distinta, de esta manera no habría relocalizaciones ni problemas porque a la hora de recuperar una referencia valdría cualquiera de las unidades que formaran el bloque. Esto no suele ocurrir, ya que el espacio estará normalmente limitado y surgirá la necesidad de reubicar alguna carga en el proceso de recuperación de otra unidad.

Varios investigadores han estudiado las operaciones de reubicación en almacenes; Watanabe (1991), Castillo and Daganzo (1993) y Kim (1997) propusieron fórmulas para el cálculo del número de reubicaciones necesarias para el proceso de recuperación aleatoria de un contenedor en un patio de contenedores. Kim (2000) planteó el problema de la localización de contenedores teniendo en cuenta el peso de cada uno. Zhang (2010) mejoró los algoritmos planteados en Kim (2000). Kim y Hong (2006) sugirieron dos métodos para determinar la nueva ubicación de los elementos reubicados. Caserta (2010) mejoró este último artículo de Kim y Hong (2006). Park y Kim (2010) compararon el número esperado de relocalizaciones en diferentes sistemas de almacenamiento.

A partir de toda esta información obtenida se decide tomar una vía para el estudio del método que a continuación se va a exponer y se considerará en adelante en este subapartado, como supone Dong-Won Yang (2013), que las prioridades en la recuperación son inciertas y que se pueden almacenar en una misma área varias cargas de diferentes grupos de manera mixta.

A continuación se va a presentar el método heurístico que minimiza las reubicaciones para el caso en que se posee la información de grupo antes de determinar el lugar de almacenamiento, ya que se considera el más interesante de los casos. Para facilitar la comprensión del algoritmo se añade una introducción acerca de los algoritmos genéticos.

### 3.2.1 Algoritmo Genético

Los Algoritmos Genéticos se usan para resolver problemas de búsqueda y optimización. Como su nombre indica se basan en el proceso genético de los seres vivos. Estos algoritmos son capaces de ir creando soluciones que resuelvan problemas del mundo real, las soluciones tenderán a valores óptimos o no lo harán, dependiendo de cómo se hayan codificado.

Los principios básicos de los Algoritmos Genéticos se establecieron por Holland (1975), pero se ha sacado de varios textos una breve introducción acerca de ellos a modo de ayuda para el siguiente subapartado. Estos textos son - Goldberg (1989), Davis (1991), Michalewicz (1992), Reeves (1993)-.

En la naturaleza los individuos de una población compiten entre sí en la búsqueda de recursos tales como comida, agua y refugio. Incluso los miembros de una misma especie compiten a menudo en la búsqueda de un compañero. Aquellos individuos que tienen más éxito en sobrevivir y en atraer compañeros tienen mayor probabilidad de generar un gran número de descendientes. Por el contrario individuos poco dotados producirán un menor número de descendientes. Esto significa que los genes de los individuos

mejor adaptados se propagarán en sucesivas generaciones hacia un número de individuos creciente. La combinación de buenas características provenientes de diferentes ancestros, puede a veces producir descendientes "superindividuos", cuya adaptación es mucho mayor que la de cualquiera de sus ancestros. De esta manera, las especies evolucionan logrando unas características cada vez mejor adaptadas al entorno en el que viven.

Los Algoritmos Genéticos usan una analogía directa con el comportamiento natural. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. En la naturaleza esto equivaldría al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Este cruce producirá nuevos individuos (descendientes de los anteriores) los cuales comparten algunas de las características de sus padres. Cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por tanto de que su material genético se propague en sucesivas generaciones.

De esta manera se produce una nueva población de posibles soluciones, la cual reemplaza a la anterior y verifica la interesante propiedad de que contiene una mayor proporción de buenas características en comparación con la población anterior. Más a lo largo de las generaciones las buenas características se propagan a través de la población. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el Algoritmo Genético ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

Los Algoritmos Genéticos son una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Si bien no se garantiza que el Algoritmo Genético encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización combinatoria. En el caso de que existan técnicas especializadas para resolver un determinado problema, lo más probable es que superen al Algoritmo Genético, tanto en rapidez como en eficacia. El gran campo de aplicación de los Algoritmos Genéticos se relaciona con aquellos problemas para los cuales no existen técnicas especializadas. Incluso en el caso en que dichas técnicas existan, y funcionen bien, pueden efectuarse mejoras de las mismas hibridándolas con los Algoritmos Genéticos.

A continuación se va a presentar el Algoritmo Genético simple, y como se realiza su codificación, lo cual será suficiente para dar una visión genérica del método para poder comprender el resto del capítulo.

### · Algoritmo simple

Se presenta el pseudocódigo de dicho algoritmo:

```

BEGIN /* Algoritmo Genético Simple */
  Generar una población inicial.
  Computar la función de evaluación de cada individuo.
  WHILE NOT Terminado DO BEGIN /*
    Producir nueva generación */
    FOR Tamaño población/2 DO
      BEGIN /*Ciclo Reproductivo */
        Seleccionar dos individuos de la anterior generación,
        para el cruce (probabilidad de selección proporcional
        a la función de evaluación del individuo).
        Cruzar con cierta probabilidad los dos
        individuos obteniendo dos descendientes.
        Mutar los dos descendientes con cierta
        probabilidad. Computar la función de evaluación
        de los dos descendientes mutados.
        Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generación.
      END
    IF la población ha convergido THEN
      Terminado:= TRUE
    END
  END
END

```

*Figura 23: Pseudocódigo Algoritmo Genético Simple. Fuente: Universidad del País Vasco (Anónimo, 2015)*

A este pseudocódigo habría que añadirle una codificación del problema adecuada al mismo. Además de una función de ajuste que asigne un número real a cada posible solución codificada. Para ejecutar el programa los padres serán seleccionados para su posterior reproducción, una vez hecho esto, los padres se cruzarán o reproducirán y generarán dos hijos sobre los que actuará un operador de mutación. Como resultado a todo lo anterior se generará una población (posibles soluciones) compuesta por una serie de individuos.

### · Codificación

Los individuos, posibles soluciones del problema, pueden ser representados como un conjunto de parámetros (denominados genes), los cuales si se agrupan formarían una ristra de valores (denominados cromosomas). La mayoría de la teoría en la que se fundamenta este algoritmo utiliza el alfabeto compuesto por el  $\{0, 1\}$  para representar a los individuos.

Biológicamente hablando el fenotipo es el conjunto de parámetros representando un cromosoma. El fenotipo contiene la información necesaria para la construcción de un organismo, al que se le llamara genotipo. En este campo de algoritmos Genéticos se usarán los mismos términos. La adaptación al problema de un individuo dependerá de la evaluación del genotipo. Esta también puede hacer a partir del fenotipo, es decir podrá computarse a partir del cromosoma, usando la función de evaluación.

La función de adaptación se diseñará específicamente para cada problema. A partir de un cromosoma particular, la función de adaptación asignará un número real, que se supone que reflejará el nivel de adaptación al problema del individuo al que representa el cromosoma.

A lo largo de la fase reproductiva se seleccionarán los individuos que se cruzarán y producirán descendencia, los cuales mutarán y construirán la siguiente población de individuos. La selección de los padres se llevará a cabo al azar usando un procedimiento en el que los individuos mejor adaptados se vean favorecidos, ya que a cada individuo se le asignará una probabilidad de ser seleccionados que es proporcional al nivel de adaptación al problema. Por tanto esto hará que los individuos con mejor nivel de adaptación sean elegidos varias veces en una generación mientras que los peor adaptados simplemente lo hagan de vez en cuando.

Una vez se han seleccionado dos padres, sus cromosomas se combinarán, utilizando los operadores de cruce y mutación.

El operador de cruce cogerá dos padres seleccionados y cortará sus ristas en una posición al azar, quedando divididos en una subristra inicial y otra final, cada padre. Posteriormente se intercambian las subristras finales quedando así dos cromosomas totalmente nuevos. Esta operación se realiza solo algunas veces, no se aplicará a todos los pares de individuos, de hecho lo hará de forma aleatoria, con una probabilidad comprendida entre el 0.5 y el 1.0. Cuando este operador no se aplique la descendencia se creará duplicando los padres.

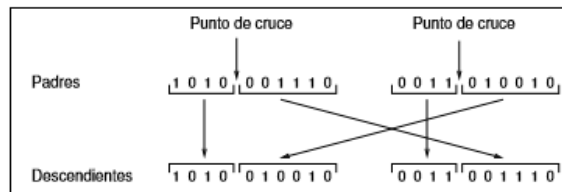


Figura 24: Ejemplo de operador de cruce aplicado a cromosomas. Fuente: Universidad del País Vasco.

El operador de mutación se aplicará a cada hijo de manera individual, y consistirá en la alteración aleatoria (con una baja probabilidad) de cada gen que compone el cromosoma.

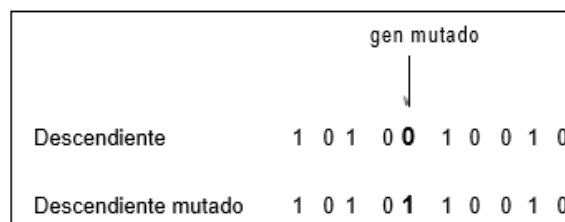


Figura 25: Ejemplo operador de mutación aplicado a cromosoma. Fuente: Universidad del País vasco.

Aunque parezca menos relevante en el resultado final la operación de mutación, cobra también mucha importancia, ya que hace que ningún punto del espacio tenga posibilidad de cero de ser examinado, lo cual será de capital importancia para que converja el problema. La operación de cruce realizará una exploración rápida del espacio de búsqueda.

Hasta aquí llega la pequeña introducción acerca de los Algoritmos Genéticos, así en el siguiente subapartado se sabrá cómo funcionan estos algoritmos.

### 3.2.2 Método heurístico de localización

Como se ha comentado anteriormente para llevar a cabo esta estrategia de distribución de unidades de carga se supondrá que la información de grupo estará disponible de manera previa a la localización, es por ello que este método intentará situar las cargas de manera que se minimicen las reubicaciones valiéndose de esta información, teniendo presente que al ser un método heurístico no llegará a la solución óptima en la mayoría de los casos.

En la

*Tabla 1* se ilustran las normas de localización respecto de la forma en la secuencia de la pila o estantería. En esta se muestra la expresión (a, b, c), esta representará el estado de la estantería que podrá ser una carga de los grupos a, b o c y estar en los niveles 1, 2 ó 3. El valor '0' indica que el correspondiente nivel está vacío. Por tanto cada posición del paréntesis sería de izquierda a derecha el grupo al que pertenecería la carga en los niveles 1°, 2° y 3°.

Como se observa en la

*Tabla 1* si queremos ubicar una unidad del grupo 1 porque acaba de llegar a la zona de almacenamiento será la pila que tenga el estado (1 0 0) la que mayor prioridad tenga ya que estará con unidades del grupo 1 en el primer nivel con lo que si colocáramos una unidad del mismo grupo en la pila no tendríamos que llevar a cabo reubicaciones. Si no hubiese ninguna pila con el estado mencionado (1 0 0), la siguiente en prioridad sería la pila con el estado (1 1 0), estado que indicaría que hay unidades del grupo 1 en el 1° y 2° nivel y está vacío en el 3°. Por tanto para asignar una unidad del grupo 1 se intenta buscar el mejor estado dentro de la fila 1 de la

*Tabla 1.* Para las unidades del grupo 2 y 3 se buscará de la misma manera en las filas 2 y 3 de la misma tabla.

*Tabla 1: Secuencia de estados de pilas o estanterías según prioridad para la ubicación de cargas entrantes. Fuente: (D.-W. Jang, 2013)*

<b>Secuencia→ Grupo↓</b>	1	2	3	4	-	11	12	13
1	(1 0 0)	(1 1 0)	(0 0 0)	(2 1 0)	-	(2 3 0)	(3 3 0)	(2 2 0)
2	(2 2 0)	(2 0 0)	(0 0 0)	(3 2 0)	-	(3 3 0)	(1 0 0)	(1 1 0)
3	(3 3 0)	(3 0 0)	(3 2 0)	(2 3 0)	-	(2 2 0)	(1 0 0)	(1 1 0)

El algoritmo Genético será usado para encontrar la mejor secuencia en orden de prioridad para cada grupo; D.-W. Jang (2013) realizó una simulación para evaluar el número de relocalizaciones esperadas para un cromosoma que representa la secuencia de prioridad. Para el caso expuesto en la *Tabla 1* un

cromosoma tendrá tres cadenas, para la primera, segunda y tercera filas representando la secuencia de prioridad correspondiente a los estados de las pilas entrantes para su almacenamiento, de los grupos 1, 2 y 3 respectivamente. Cada gen en una cadena estará representado por el número de identificación del estado de una pila.

Así, el algoritmo es:

### ***Inicialización***

Crear al azar un número dado de cromosomas.

### ***Selección***

Se aplica el procedimiento de selección para generar una nueva población. Los cromosomas son seleccionados al azar de manera que tenga el mismo tamaño que la población anterior. Comparándolos entre ellos, el cromosoma dominante sobrevivirá y después se coloca aleatoriamente en la nueva población.

### ***Mutación***

Se selecciona el cromosoma al azar de la población previa y se selecciona una cadena al azar del cromosoma seleccionado. Seleccionar dos genes al azar de la cadena elegida y a continuación intercambiarlos entre sí. Repetir este paso hasta que el nivel de mutación sea satisfactorio. Colocar el cromosoma resultante tras la mutación en aleatoriamente en la nueva población.

### ***Cruce***

El operador de cruce se aplica para generar la nueva población. Los genes de cada descendiente entre dos puntos de corte se heredan de uno de sus padres. Los bordes de la cadena serán heredados del otro padre. Una parte de la nueva población se genera a través de la selección y la mutación. La parte restante se completa con los cromosomas generados por la orden de cruce.

## **3.2.3 Evaluación de la información de grupo para el número esperado de reubicaciones**

Se presenta a continuación un ejemplo para mostrar cómo se realizaría el cálculo del número de manipulaciones necesarias. Se supone que el número total de unidades almacenadas es de doce en tres grupos ( $n=12$ ,  $m=3$ ). Dadas las dimensiones del área de almacenamiento con cuatro pilas o estanterías y tres niveles, el número esperado de manipulaciones necesitadas para extraer una unidad se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$E(t) = h(t) \times P(t) = \sum_{t=1}^T (h(t) \times P(t))$$

*Siendo: Número esperado de manipulaciones necesarias para sacar una unidad ( $E(t)$ ). Número de manipulaciones para extraer una unidad en el área de almacenamiento ( $h(t)$ ). Probabilidad de que un grupo específico de unidades se retiren de una pila en un nivel  $t$  ( $P(t)$ ).*

Si desarrollamos esta fórmula quedaría:

$$E(t) = \sum_{t=1}^T (h(t) \times \sum_{g=1}^m (p_g \frac{(1 - q_g)^{(T-t)R} \{1 - (1 - q_g)^R\}}{1 - (1 - q_g)^{TR}}))$$

Siendo: Número de estanterías o pilas ( $R$ ). Número máximo de niveles ( $T$ ). Número de grupos de unidades de almacenamiento ( $m$ ). Probabilidad de que una unidad en el área de almacenamiento sea del grupo  $g$  ( $q_g$ ). Probabilidad de que una solicitud de recuperación sea para una unidad del grupo  $g$ .

Si se quisiera calcular estas probabilidades porque no fueran dadas el método sería el siguiente:

$$q_g = d_g \frac{f_g}{\sum_{g=1}^m (d_g f_g)} \quad p_g = \frac{f_g}{\sum_{g=1}^m f_g}$$

Siendo: El tiempo promedio que las unidades están en el grupo  $g$  ( $d_g$ ). Frecuencia de retirada por unidad de tiempo para el grupo  $g$  ( $f_g$ ).

Si se particulariza la ecuación con los datos expuestos anteriormente, se obtiene un valor de  $E=1.2245$  suponiendo que las unidades de carga ocupan posiciones al azar según van llegando. A continuación se aplica el Algoritmo Genético para reducir el número de manipulaciones. Se supondrá el número de poblaciones de mil y el tamaño de la población de cien. El tamaño de la selección es de dos. Y los ratios de cruce y mutación iguales a 0.5 y 0.01 respectivamente. A continuación en la

Tabla 2 Tabla 1 se muestra el resultado obtenido para los dos casos, con o sin información. En esta se puede ver que el número de manipulaciones se puede ver minimizado si se optimizan las localizaciones de las unidades de almacenamiento entrantes. Los resultados de esta simulación se han obtenido de D.-W. Jang (2013) y aparecerá reflejado el número de manipulaciones esperado además de la comparación entre ambos casos.

Tabla 2: Resultado de la simulación Algoritmo Genético aplicado al caso  $n=12$   $m=3$ . Fuente: (D.-W. Jang, 2013)

Número de estanterías o pilas	Sin información acerca del grupo	Con información acerca del grupo	Diferencia entre ambos casos
3	1.338	1.198	15.8
4	1.225	1.073	14.1
5	1.131	1.004	12.7
6	1.085	1.000	8.5
7	1.045	1.000	4.5

Se puede observar que mejorando la localización de las cargas que llegan para ser almacenadas se podrá conseguir minimizar el número de reubicaciones considerablemente. Es por tanto un método bastante común en contenedores en puertos y similares, siempre que cumpla las condiciones expuestas en este apartado. El método iría variando sensiblemente a medida que las condiciones cambiaran pero no van a ser estos casos objeto de este estudio, para no profundizar demasiado y sí reflejar la idea general de este algoritmo.

### 3.3 Método de optimización de la profundidad para almacenamiento en bloque

Este método está ideado para optimizar el almacenamiento en bloque en almacenes. Se centra en calcular la profundidad de los carriles en las estanterías, ya que se considera que no ha sido tratado con la suficiente dedicación este detalle, y que puede aportar mucho al almacenamiento.

Durante años la optimización del espacio ha sido uno de los objetivos principales a la hora de diseñar y regular almacenes (Van den Berg, 1999). El almacenamiento en bloque es un sistema de almacenamiento de bajo coste y convencional, cuyo rendimiento depende del uso eficiente del espacio. Las SKU se situarán una encima de la otra en carriles cuya profundidad será objetivo de este método. Los pallets se apilan en el suelo del almacén hasta una altura máxima que dependerá de las condiciones y altura de los pallets, peso de la carga, límites de seguridad, etc. Es un sistema con un bajo coste de implementación, pero complicado de gestionar en términos de espacio. Generalmente se puede hablar de dos políticas utilizadas para gestionar espacios de almacenamiento de esta manera, son la política dedicada y la de almacenamiento compartido. En la política dedicada, los carriles están dedicados a referencias concretas y solo se permitirá el almacenamiento de SKUs de una referencia. Por tanto un carril puede estar vacío hasta que se reponga con una SKU del tipo asignado a ese carril. Por otro lado, la política de almacenamiento compartido no restringe los carriles a un tipo concreto de SKU y podrá almacenarse cualquier SKU dentro de un carril siempre y cuando esté vacío o contenga una unidad de carga del mismo tipo. Esta política optimizará el uso del espacio pero dificultará el proceso de picking, ya que las ubicaciones de cada referencia irán cambiando según la disponibilidad, mientras que con la política dedicada se designarán las localizaciones para las SKU según convenga por su ubicación.

La política compartida tendrá la dificultad de que cuando por ejemplo, la variedad de referencias es amplia y la cantidad de inventario es pequeña, no es justificable cerrar un carril por una sola SKU de una referencia, por tanto a veces tienen que completarse los carriles con SKUs de diferentes referencias. En estos casos se producirá un bloqueo que es inevitable. No obstante, si estará en manos de los encargados del almacén minimizar el número de reubicaciones, tal y como se buscaba en métodos anteriores, sirven como inspiración autores que trataron temas parecidos como Kim (Kim, 2006), Jang (2013), Petering y Hussein (Petering, 2013).

En el caso en que una referencia tenga un inventario de bastante grande se impedirá el bloqueo en los carriles asignados a estas referencias, una vez un palet de una SKU entre en un carril no se permitirá el almacenamiento de otra referencia distinta. Exceptuando los momentos en que está completamente lleno o vacío el carril. Esta política será poco eficiente a la hora del uso del espacio, ya que tendrá huecos libres sin poder ser usados dentro de algunos carriles, a este fenómeno también se le conoce como “honeycombing”, y llevará asociado con él un desperdicio en el que incurrirá el sistema (Hudock, 1998). También contribuyen al desperdicio de espacio los pasillos. Los diseñadores de almacenes tienen como objetivo minimizar estos dos tipos de desperdicio.

Las investigaciones relacionadas con el almacenamiento en bloque fueron las siguientes, Kind (1975) fue el primero que habló del equilibrio entre la profundidad y la anchura en el almacenamiento en bloque. Propuso en su estudio un modelo que encontraba aproximadamente la profundidad óptima de carril para minimizar el desperdicio de espacio, su modelo era para una sola referencia. Matson (1982) sería quien ampliaría este estudio de Kind con una aproximación más precisa para un única referencia y lo extendió para el cálculo con varias referencias. Numerosos autores fueron investigando, aportando teorías y ampliándolas con el paso de los años hasta llegar a Bartholdi (Bartholdi, 2014) que desarrolló el modelo de Matson (1982) pero optimizando la utilización del volumen.



Todos estos estudios anteriormente citados suponen la descarga y almacenamiento instantáneos. Esta suposición será válida si se aplica a un centro de distribución donde los camiones descargan rápidamente los pallets de diferentes referencias (ritmo infinito en la entrada), pero será menos acertada para el caso en que se sitúe en un centro de fabricación donde se almacenarán los productos al ritmo que lleve la producción (finito).

El cálculo de las pérdidas en almacenamiento vendrá dado por tres tipos de desperdicio, el desperdicio causado por “honeycombing” ( $D_h$ ), el desperdicio generado por pasillos ( $D_a$ ) y el desperdicio de posiciones sin ocupar en la parte alta de los carriles ocupados ( $D_u$ ). Estos últimos desperdicios en los modelos con una única referencia no se incluirán porque no influirán en la profundidad óptima. Normalmente al haber un número elevado de referencias o de tipos de SKU no será factible asignar un carril a cada una y calcular su profundidad óptima. Por tanto se calculará la profundidad óptima común de carril, una que minimice el desperdicio total para varias referencias.

A continuación se presentan los tres casos que se consideran de interés y aunque no se entrará de demasiados cálculos, si se revisarán las condiciones, el funcionamiento y las conclusiones de estos métodos tomando como referencia el estudio llevado a cabo por Shahab Derhami (2016).

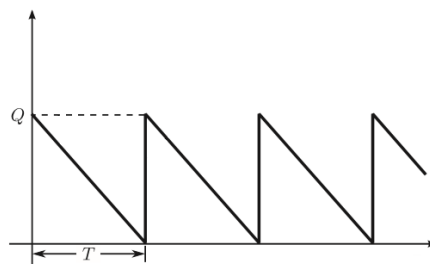
Para los siguientes subapartados se tomarán los siguientes datos, se producirá un lote de pallets  $Q$  de una referencia a la tasa de producción determinista  $P$  (pallets/ud. tiempo) apilados en carriles con una profundidad de  $x$  pallets y una altura de  $z$  pallets. Estos se descargarán a la tasa determinista de  $\lambda$  (pallets/ud. tiempo) y unos pasillos de anchura  $a$  pallets.

### 3.3.1 $P = \infty$ , tasa de demanda constante

Para este caso los pallets son almacenados instantáneamente en el almacén y descargados a un ritmo finito. El ritmo de producción puede considerarse infinito. Kind (1975) propuso una fórmula para el cálculo de la profundidad de línea óptima, pero no la derivó, sin embargo Matson (1982) desarrolló otra aproximación. Para este caso Shahab Derhami (2016) derivó la fórmula de la profundidad óptima y así corrigió a Matson, además también consideró la utilización del volumen en lugar del suelo como ya propuso Bartholdi (2014).

$$x^* \approx \sqrt{\frac{Qa}{z}} - \frac{a}{2} \quad (1)$$

A continuación en la *Figura 26* se muestra los cambios que sufre el inventario (eje  $y$ ) de una referencia, almacenado en las condiciones de este apartado.



*Figura 26: Inventario en sistema con  $P$  infinita y demanda constante. Fuente: Larrañeta y Onieva (1988)*

### 3.3.1.1 Profundidad óptima de la línea o carril para una única referencia

Se sabe que el número de carriles requerido para el almacenamiento es  $[Q/zx]$ , donde  $[x]$  es el número entero no inferior a  $x$ . Despejando se obtendría el número de carriles aproximado:

$$K \approx \frac{Q}{zx} \quad (2)$$

Se asume que los carriles están completamente llenos, están siendo descargados a un ritmo de  $\lambda$  pallets por unidad de tiempo. Una vez que se descarga el primer pallet, el carril tendrá un desperdicio porque esta posición no podrá ser ocupada por otra unidad, esto será durante un período de tiempo de  $(1/\lambda)$ , y así sucesivamente hasta que la última posición sea descargada, hasta ese momento había  $(zx-1)$  posiciones desocupadas. El tiempo total de tiempo desperdiciado por "honeycombing" en una línea es:

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right) (1 + 2 + \dots + (zx-1)) \quad (3)$$

Multiplicando (3) por los carriles aproximados obtenemos:

$$Dh \approx \left(\frac{1}{\lambda}\right) \left(\frac{Q(zx-1)}{2}\right) \quad (4)$$

Da se calcula el tiempo total que los carriles están ocupados y requieren accesibilidad. De esta manera, el último carril será el que tenga más posibilidades de estar ocupado por tanto será descargado primero, y los carriles restantes serán descargados arbitrariamente. El carril descargado en último lugar permanece ocupado hasta que se descarga el lote  $Q$  al completo. Por tanto permanecerá ocupado durante  $((1/\lambda) Q)$  períodos de tiempo. El carril descargado antes que este permanecerá vacío  $((1/\lambda) zx)$  períodos de tiempo antes de que se descargue el último carril. Por tanto permanece vacío  $((1/\lambda) Q - zx)$  períodos de tiempo, si se aplica esto al resto de carriles el resultado es:

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right) (Q + (Q - zx) + (Q - 2zx) + \dots + (Q - Kzx)) \quad (5)$$

Cada uno de los pasillos es compartido por carriles situados a ambos lados del pasillo, por tanto la mitad del pasillo está dedicada a cada carril. Será igual a  $(az/2)$  pallets. Por tanto:

$$Da \approx \left(\frac{1}{\lambda}\right) \left( Q(K+1) - \left(\frac{K(K+1)}{2}\right) zx \right) \left(\frac{az}{2}\right) \quad (6)$$

Ot viene dado por:

$$O_T \approx \left(\frac{1}{\lambda}\right) (Q + (Q - 1) + \dots + 1) \approx \left(\frac{1}{\lambda}\right) \left(\frac{Q(Q+1)}{2}\right) \quad (7)$$

Y por tanto la utilización del espacio queda:

$$U \approx \frac{O_T}{O_T + Da + Dh} \approx \frac{2x(Q + 1)}{(2x + a)(Q + zx)} \quad (8)$$

Finalmente el desperdicio promedio de espacio es obtenido sumando (4) y (6) y dividiendo el resultado por T, lo cual es equivalente a  $(Q/\lambda)$ . Quedando:

$$D \approx \left(\frac{1}{4x}\right)(Qa - 2x + zx(2x + a)) \quad (9)$$

En base a estas ecuaciones Shahab Derhami (Shahab, 2016) enuncia la siguiente proposición.

**PROPOSICIÓN:** La profundidad óptima de carril para una pila usando el método de apilamiento en bloque para una sola referencia, con un lote de Q pallets que es instantáneamente almacenada en un almacén es:

$$x^* = \sqrt{\frac{Qa}{2z}} \quad (10)$$

**PRUEBA:** Esta profundidad óptima se obtiene derivando la expresión (9) con respecto a x, igualando a cero y despejando el valor de x. Si se deseara obtener soluciones enteras se debería calcular los valores enteros redondeados por arriba y por debajo de  $x^*$  e introducirlos en (9) y comparar.

### 3.3.1.2 Profundidad óptima de carril común para varias referencias

Du necesita para el modelo de una sola referencia. Si se denota la altura libre del almacén por e pallets de para una referencia por tanto  $((e-z)x)$  será el total de posiciones de pallet desperdiciadas por carril o estantería, para el período de tiempo que el carril está ocupado por esa referencia. El tiempo total que todas las líneas viene expresado por:

$$Du \approx \left(\frac{1}{\lambda}\right) \left( Q(K + 1) - \left(\frac{K(K + 1)}{2}\right) zx \right) (e - z)x \quad (11)$$

Se llamará a la altura de un pallet de una referencia,  $h_i$ . Diferentes SKUs o referencias pueden tener diferentes alturas. Para que esto se tome en cuenta, todas las expresiones de desperdicios habrá que multiplicarlas por un factor  $h_i$ . El desperdicio total de espacio de almacenamiento para cada SKU se obtiene agregando los tres tipos de desperdicio. Se llamará al menor común múltiplo del tiempo de ciclo de inventario de todas las referencias como  $T_{mcm}$ . Ya que las SKUs tienen diferentes tiempos de ciclo de inventario,  $D_c$  se calcula calculando el desperdicio total para todas las referencias, generado en  $T_{mcm}$ ; y dividiendo el resultado por  $T_{mcm}$ . La rotación de inventario para la SKU i en  $T_{mcm}$  es  $T_{mcm} * (\lambda_i / Q_i)$ , y multiplicándolo por el desperdicio total de la referencia i generado en este tiempo de ciclo de inventario dando así, el desperdicio total para la SKU i. Sumando estos desperdicios para todas las SKU y dividiendo por  $T_{mcm}$ , se cancelarán términos, por tanto  $D_c$  se obtendrá como la suma de los desperdicios para todas las SKUs.

$$Dc \approx \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_i}{4z_i} \right) (Q_i e_i (2x + a) + z_i x (2e_i x + a e_i - 2Q_i - 2)) \quad (12)$$

El cálculo de utilización del espacio ( $U_c$ ):

$$U_c \approx \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_i}{Q_i} \right) (O_T^i)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_i}{Q_i} \right) (O_T^i + D_a^i + D_h^i)} \approx \frac{2x \sum_{i=1}^n h_i (Q_i + 1)}{(2x + a) \sum_{i=1}^n e_i h_i \left( \frac{Q_i}{z_i} + x \right)} \quad (13)$$

donde  $O_T^i, D_a^i, D_h^i$  se obtienen de las ecuaciones (7), (6) y (4) para cada referencia  $i$ . Nótese que  $Tmcm$  se ha cancelado de la ecuación.

**PROPOSICIÓN:** la profundidad óptima común de carril para varias SKUs con lotes de pallets almacenados instantáneamente en un almacén es

$$x_c^* \approx \sqrt{\frac{a \sum_{i=1}^n \left( \frac{e_i h_i}{h_i} \right) Q_i}{2 \sum_{i=1}^n e_i h_i}} \quad (14)$$

**PRUEBA:** Derivando la ecuación (12) con respecto a  $x$ , igualándola a cero y despejando la  $x$  se obtiene este resultado.

### 3.3.2 $P > \lambda$ , tasa de demanda constante

Este será un caso muy habitual en sistemas de fabricación por ejemplo, donde los pallets son producidos a ritmos de producción finitos, almacenados y descargados a un ritmo finito también. A continuación en la *Figura 27* se muestra como se comportaría el inventario de una SKU en este sistema. En esta podemos observar distintos períodos de tiempo  $T1$  se referirá a la fase de producción en la que los pallets  $Q$  de la SKU se producen a un ritmo  $P$  y se almacenan en las estanterías. Como la demanda es constante, los pallets siguen descargándose en este período a una tasa  $\lambda$ . Se supone entonces que los carriles estarán llenos a un ritmo de  $(P - \lambda)$ . Al final de  $T1$  la producción se detiene, en el nivel máximo de inventario. Entonces en  $T2$  el inventario comienza a disminuir a una tasa de  $\lambda$ . Como la demanda es constante el tiempo de ciclo de inventario,  $T$ , es igual a  $(Q / \lambda)$ , el máximo inventario a la mano,  $H$ , es igual a  $(Q - [Q \lambda / P])$ , y el máximo número de líneas requeridas para almacenamiento es  $([H / zx])$  donde  $[x]$  es el entero mayor no mayor a  $x$ . Obteniéndose así las siguientes aproximaciones:

$$H \approx \frac{Q(P - \lambda)}{P} \quad (15)$$

$$K \approx \frac{Q(P - \lambda)}{Pzx} \quad (16)$$

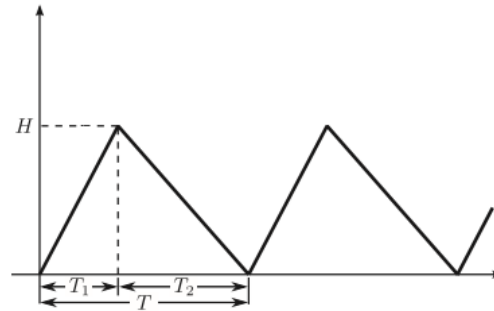


Figura 27: Comportamiento nivel inventario en sistema con  $P > \lambda$  y demanda constante. Fuente: Larrañeta y Onieva (1988)

### 3.3.2.1 Profundidad óptima de carril para una única referencia ( $P > \lambda$ )

El desperdicio  $D_h$  se genera en dos fases, las referentes a  $T_1$  y a  $T_2$ . Primeramente se calcula el anterior. Una vez el pallet es almacenado en un carril vacío,  $(zx - 1)$  posiciones de pallet son desperdiciadas en el carril durante  $1/(P - \lambda)$  períodos de tiempo. Este es el tiempo que se necesita hasta que la siguiente posición no ocupada está completa. Luego,  $(zx - 2)$  posiciones de pallet se desperdician en el mismo período de tiempo. Este desperdicio se genera y acumula hasta que la última posición no ocupada se llena. Por tanto, el desperdicio total por “honeycombing” en un carril con una única SKU en  $T_1$  es:

$$\left(\frac{1}{P - \lambda}\right) \left( (zx - 1) + (zx - 2) + \dots + (zx - (zx - 1)) \right) \quad (17)$$

Multiplicando (17) por  $K$  se obtiene

$$D_{h_{T_1}} \approx \left(\frac{zx - 1}{2}\right) \left(\frac{Q}{P}\right) \quad (18)$$

Para el período  $T_2$  se hará como se hizo en (3) y multiplicándolo por  $K$

$$D_{h_{T_2}} \approx \left(\frac{zx - 1}{2\lambda}\right) \left(\frac{Q(P - \lambda)}{P}\right) \quad (19)$$

Da se calcula aproximando el tiempo total que están ocupados los carriles en  $T_1$  y  $T_2$ . cada vez que el primer pallet es almacenado en una línea en  $T_1$ , esta resulta ocupada hasta que  $(H - 1)$  posiciones están llenas. Como el inventario crece a la tasa de  $(P - \lambda)$ , este carril o línea queda ocupado durante  $(H - 1)/(P - \lambda)$  períodos de tiempo. La segunda línea se usa cuando la primera queda completamente llena. Lo cual significa que  $(H - zx)$  posiciones de pallet se necesitan para estar llena. Cada vez que el primer pallet es almacenado en la segunda línea, esta quedará ocupada hasta que  $(H - 1 - zx)$  posiciones de pallet sean completadas. Por tanto estará ocupada durante  $(H - 1 - zx)/(P - \lambda)$  períodos de tiempo. Al final el tiempo total que todas las líneas estarán ocupadas en  $T_1$  será

$$\left(\frac{1}{P-\lambda}\right)\left((zx-1) + (zx-2) + \dots + (zx-(zx-1))\right) \quad (20)$$

El tiempo total que las líneas estarán ocupadas en T2 se calcula de manera análoga a como se hace en (5) pero en esta H pallets son descargados, por tanto H se substituye por Q. Y como espacio dedicado a pasillo ( $az/2$ ).

$$D_a \approx \left(\left(\frac{1}{P-\lambda} + \frac{1}{\lambda}\right)\left(H(K+1) - zx\left(\frac{K(1+K)}{2}\right)\right) - \frac{K}{P-\lambda}\right)\left(\frac{az}{2}\right) \quad (21)$$

Ot se computará en T1 y T2

$$O_T \approx \left(\frac{1}{P-\lambda}\right)(1+2+\dots+(H-1)) + \left(\frac{1}{\lambda}\right)(H+(H-1)+\dots+1) \quad (22)$$

Quedando al final

$$U \approx \frac{2x(Q(P-\lambda) + P - 2\lambda)}{(2x+a)(Q(P-\lambda) + Pzx - 2\lambda)} \quad (23)$$

El desperdicio total de espacio de almacenamiento se obtiene de la suma de los tres tipos de desperdicio para el período T1 y T2 y por tanto habrá que dividir por T, quedando:

$$D \approx \left(\frac{1}{4Px}\right)\left(2Px(zx-1) + aP(Q+zx) - a\lambda(Q+2)\right) \quad (24)$$

Shahab Derhami (Shahab, 2016) presenta una gráfica en su estudio que resulta muy intuitiva ya que compara la utilización de espacio con el desperdicio de espacio en función de la profundidad de línea, viendo los valores de cada una para la  $x^*$ , a continuación se presenta en la *Figura 28*:

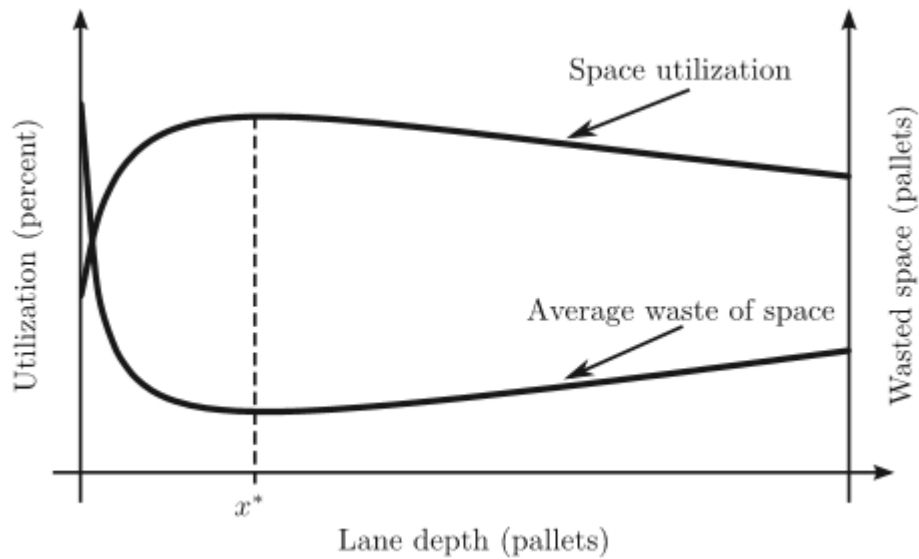


Figura 28: Gráfica de desperdicio frente a utilización. Fuente: Shahab Derhami (2016)

PROPOSICIÓN: La profundidad óptima de línea para almacenamiento en bloque para una SKU cuyo lote de pallets se produce a una tasa  $P$  y se descarga a una tasa  $\lambda$ , con  $P > \lambda$ , es

$$x^* \approx \sqrt{\frac{a(Q(P - \lambda) - 2\lambda)}{2zP}} \quad (25)$$

PRUEBA: Se prueba realizando la derivada de (24) e igualándola a cero y despejando la  $x$ .

### 3.3.2.2 Profundidad óptima de carril común para varias referencias

Du se calcula multiplicando el tiempo total que las líneas están ocupadas en T1 y T2, por el volumen no ocupado en lo alto de los carriles, el cual es  $(e - z)x$  pallets . Da se computa de manera similar que en (21), multiplicad. Se escalan los desperdicios multiplicando por estas fórmulas por  $h_i$ . Sumar sumándolas y dividiendo el resultado por 7.

$$D_c \approx \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{4P_i z_i} \right) (P_i(Q_i e_i(2x + a) + z_i x(2e_i x - 2Q_i + a e_i - 2)) - \lambda(Q_i + 2)(2x(e_i - z_i) + a e_i)) \quad (26)$$

Uc se obtiene como en (13). Resulta

$$U_c \approx \frac{2x \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{P_i}\right) (Q_i(P_i - \lambda_i) - 2\lambda_i + P_i)}{(2x + a) \sum_{i=1}^n e_i h_i \left(x + \left(\frac{1}{P_i z_i}\right) (Q_i(P_i - \lambda_i) - 2\lambda_i)\right)} \quad (27)$$

PROPOSICIÓN: La profundidad óptima común de carril para n SKUs cuyos lotes de pallets se producen al ritmo de P y se descargan al ritmo de  $\lambda$ , donde  $P > \lambda$ , es

$$x_c^* \approx \sqrt{\frac{a \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i h_i}{z_i P_i}\right) (Q_i(P_i - \lambda_i) - 2\lambda_i)}{2 \sum_{i=1}^n e_i h_i}} \quad (28)$$

PRUEBA: Se obtendrá derivando la ecuación (26) con respecto a x, igualando a cero y despejando x.

### 3.3.3 $P < \lambda$ , tasa de demanda constante

En este caso se plantea el hecho de que la tasa de demanda sea mayor que la de producción, pero que no sea constante la demanda. La estrategia que una empresa debe emplear en estos casos es hacer “make-to-stock”, con el fin de cumplir la demanda y ponerse al día con esta. Se supone que la demanda es conocida, en caso contrario se trabajaría con una previsión de la demanda, pero esta no será la situación. La producción se iniciará pronto, para conseguir un stock suficiente para poder hacer frente al ritmo de la demanda. Se observa en la *Figura 29* el comportamiento que tendría el inventario considerando los ritmos de producción. En T1 la referencia se produce y almacena, en este período no se produce descarga, los carriles se llenan a la tasa P. La descarga se inicia en el período T2 mientras siguen produciéndose unidades. En este período la demanda se satisface mediante el inventario y la producción en conjunto. Debido a que la tasa de demanda es mayor que la de producción, los carriles se descargan al ritmo de  $(\lambda - P)$ . Un ejemplo de aplicación para este tipo de situación serían los productos de temporada.



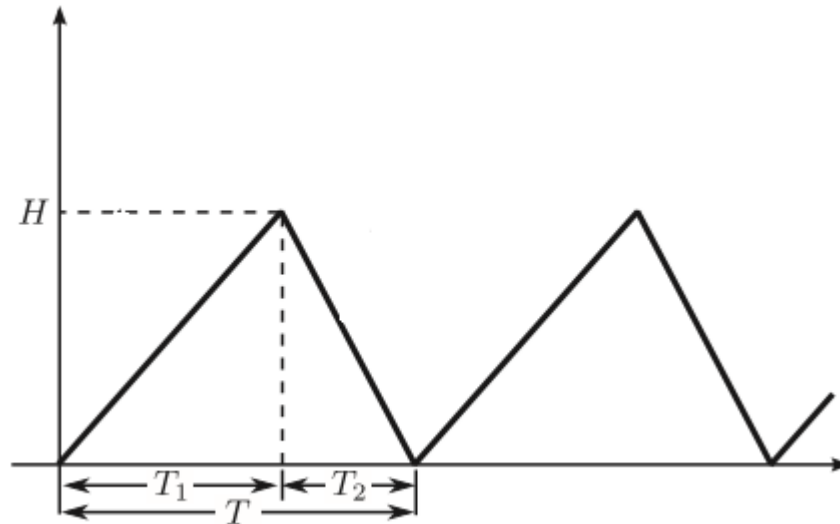


Figura 29: Comportamiento inventario frente a tiempo, caso  $P < \lambda$ . Fuente: Larrañeta y Onieva (1988)

El inventario alcanzará el máximo de su valor en  $T_1$ ;  $T_1$  es  $(H/P)$  períodos de tiempo. El lote completo se descarga en  $T_2$ ;  $T_2$  es  $(Q/\lambda)$  y el tiempo de ciclo de inventario,  $T$ , es  $(Q/P)$ . El máximo número de carriles requeridos para el almacenamiento es  $([H/zx])$ , donde  $H$  es  $(Q - [QP/\lambda])$ . Se sacan así las siguientes aproximaciones:

$$H \approx \frac{Q(\lambda - P)}{\lambda} \quad (29)$$

$$K \approx \frac{Q(\lambda - P)}{\lambda zx} \quad (30)$$

### 3.3.3.1 Profundidad óptima de carril para una referencia

Dh en  $T_1$  y  $T_2$  se calcula sustituyendo con las tasas de  $P$  y la de la descarga en (17) y con  $(\lambda - P)$  en (3). Da y  $O_t$  se sacan de manera parecida actualizando las tasas de llenado y agotamiento en (21) y (22), respectivamente. Resultando:

$$U \approx \frac{2x(Q(\lambda - P) + 2P - \lambda)}{(2x + a)(Q(\lambda - P) + \lambda zx + 2P - 2\lambda)} \quad (31)$$

$D$  quedará determinada sumando los diferentes tipos de desperdicio y dividiendo el resultado por  $T$ , el cual es  $(Q/P)$ . Quedando:

$$D \approx \left(\frac{1}{4\lambda x}\right) (2\lambda x(zx - 1) + a\lambda(Q + zx - 2) - aP(Q - 2)) \quad (32)$$

PRPOSICIÓN: La profundidad óptima de carril para un única SKU cuando la tasa de producción es P, y la de descarga  $\lambda$ , siendo  $P < \lambda$ , es:

$$x^* \approx \sqrt{\frac{a(Q-2)(\lambda-P)}{2z\lambda}} \quad (33)$$

PRUEBA: realizando la derivada de (32) en función de x, igualando a cero y despejando el valor de x, obtendremos la anterior ecuación.

### 3.3.3.2 Profundidad óptima común de carril para varias referencias

Du se calcula como se describe en la sección 3.3.2.2 usando los ratios de llenado y descarga actuales. Da se calcula como se describe para una única referencia, en este caso el espacio que se requiere por accesibilidad pasa a ser  $(ez/2)$ . Para contabilizar de manera correcta todas las alturas en las expresiones de desperdicio, estas se regulan multiplicándolas por  $h_i$ . Sumando las D's (desperdicios) de todas las SKU, quedando la fórmula de desperdicio total como sigue:

$$D_c \approx \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_i}{4\lambda_i z_i x} \right) \left( \lambda_i (e_i (Q_i - 2)(2x + a) + z_i x (2e_i x + ae_i - 2Q_i + 2)) - P_i (Q_i - 2)(2x(e_i - z_i) + ae_i) \right) \quad (34)$$

Tras la simulación mediante un pseudo-código Shahab Derhami (Shahab, 2016) llegó a:

$$U_c \approx \frac{2x \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_i}{\lambda_i} \right) (Q_i (\lambda_i - P_i) + 2P_i - \lambda_i)}{(2x + a) \sum_{i=1}^n e_i h_i \left( x + \left( \frac{1}{\lambda_i z_i} \right) (Q_i (\lambda_i - P_i) + 2P_i - 2\lambda_i) \right)} \quad (35)$$

PROPOSICIÓN: La profundidad óptima común de carril para almacenar con n referencias, cuyos lotes se producen a un ritmo P y se descargan a un ritmo  $\lambda$ , donde  $P < \lambda$ , es:

$$x_c^* \approx \sqrt{\frac{a \sum_{i=1}^n \left( \frac{e_i h_i}{\lambda_i z_i} \right) (Q_i - 2)(\lambda_i - P_i)}{2 \sum_{i=1}^n e_i h_i}} \quad (36)$$

PRUEBA: Derivando (34) en función de x, igualando a cero y despejando se obtiene x óptima común.

### 3.3.4 Método propuesto

Una vez mostrados los tres métodos elegidos a modo de ejemplo de almacenamiento en bloque con sus diferentes casos y escenarios en los que pueden aparecer, se observa que una medida interesante sería aunar dos de estos tres métodos para así llevar a cabo un mejor diseño del espacio de almacenamiento; ya que se considera que el resultado de uno puede ser el comienzo del siguiente. El procedimiento de diseño por tanto sería en un diseño en dos fases.

La primera etapa sería llamada fase I, y en ella se emplearía el método de optimización de la profundidad de carril para las estanterías. Como se ha explicado anteriormente, para realizar el cálculo se necesitaría conocer la tasa de producción de pallets, la tasa de descarga de estas, la anchura de los pasillos necesaria para que los equipos de manufactura puedan maniobrar, la altura de las estanterías y la tasa de demanda. A partir de estas condiciones de almacenamiento se llegaría a obtener la profundidad óptima necesaria para las estanterías si se quisiera implementar un sistema de almacenamiento en el escenario propuesto. Minimizando el desperdicio de espacio de almacenamiento. El resultado de esta fase I, que sería la profundidad óptima, serviría como variable de entrada en la fase II, como se verá a continuación.

La segunda etapa de este proceso de diseño propuesto se centraría en realizar un diseño óptimo de la zona de almacenamiento, ubicando las estanterías y pasillos, potenciando la densidad de almacenamiento. Como se puede intuir el método utilizado para esta fase II será el método de almacenamiento de lata densidad, explicado también anteriormente. En este caso los datos de los que se partirá serán, la profundidad de los carriles o líneas (resultado obtenido en fase I), dimensiones de la zona de almacenamiento de la que se dispondrá. A partir de estos datos y tal y como se ha explicado apartados anteriores se diseñará de manera óptima un almacén, en busca de la mayor densidad posible, y el menor desperdicio de espacio.

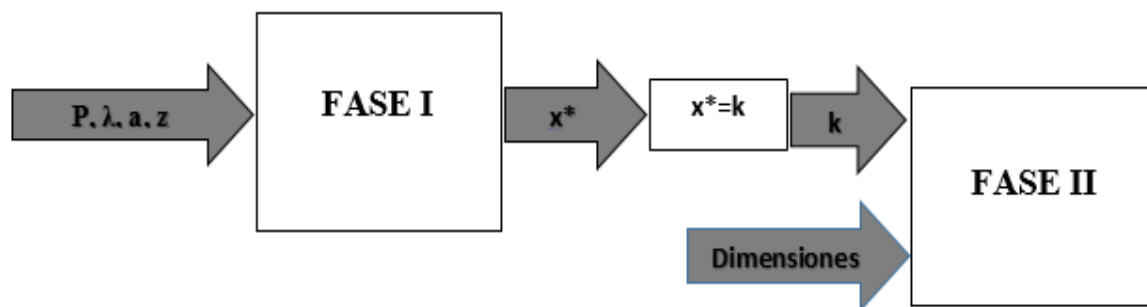


Figura 30: Esquema método propuesto. Fuente: elaboración propia.

Para ilustrar este método propuesto se presenta en el siguiente capítulo un ejemplo práctico de diseño de almacenes utilizando este procedimiento conseguir el almacén que optimice la utilización de espacio y minimice el desperdicio acumulado.

## 4 APLICACIÓN PRÁCTICA

### 4.1 Fase I. Aplicación para el método de cálculo de profundidad óptima

A continuación se muestra un ejemplo simple pero ilustrativo de cómo se diseñaría un almacén minimizando el desperdicio de espacio y maximizando el uso de este. En este caso se llevará a cabo para una única referencia, con el fin de simplificar y poder realizar los cálculos sin necesidad de utilizar una simulación. El método de resolución será el del apartado 3.3 y el almacén y el proceso de almacenamiento tendrán las siguientes características.

Se considera un lote de 10 pallets de una única referencia como ya se ha dicho, estará almacenada con las siguientes condiciones:

- Se tomará un ritmo de producción de,  $P = 1/3$  (pallets/hora).
- Altura de apilamiento de,  $z = 2$  pallets.
- Ritmo de descarga de,  $\lambda = 1/10$  (pallets/hora).
- Anchura de pasillo de,  $a = 2$  pallets.

Y se calculará el desperdicio de espacio de almacenamiento (pallets) dependiendo de la profundidad, como se vió en el apartado 3. Se obtendrían diferentes resultados que nos darán una idea de cómo influye la profundidad en la minimización del desperdicio.

#### 4.1.1 Profundidad, $x=3$ pallets

Se comienza con una profundidad al azar, por ejemplo,  $x=3$ . Y se plantea el cálculo de manera discreta de los instantes de tiempo en los que cambiaría el estado del carril. En cada uno de estos instantes se muestra las posiciones ocupadas, bloqueadas y de pasillo, para los dos carriles que serán necesarios como se verá más adelante; los elementos producidos, almacenados y descargados; y los desperdicios de espacio, ya sean por “honeycombing” ( $D_h$ ), o ya sea por los pasillos ( $D_a$ ). A partir de estos datos, que como ya se ha dicho se obtienen para todos los instantes en los que se da un cambio de estado, se sacará el desperdicio de espacio de almacenamiento durante el tiempo de ciclo de inventario, obtenido como el área debajo de la curva que representa a lo largo del tiempo el desperdicio del espacio de almacenamiento.

Cómo se puede observar en la *Figura 1* *Figura 31*, en la tabla realizada en Excel aparecen los instantes que determinan un cambio, para este caso concreto comenzaría en  $t=0$  donde no habría espacio ni

ocupado ni bloqueado, y estaría libre para cualquier SKU. El siguiente instante marcado sería  $t=3$ , momento en el que se produciría y almacenaría la primera unidad, por tanto se ocuparía una posición, se bloquearían cinco posiciones en las que no se podría almacenar ninguna otra referencia y habría cuatro posiciones destinadas a los pasillos. Con todo esto se llegaría a la conclusión de que para  $t=3$  habría un desperdicio de nueve pallets, cuatro debidos a los pasillos y cinco bloqueados por “honeycombing”. Se seguiría simulando el paso del tiempo, y el siguiente evento sería en  $t=6$ , momento en el que se cargaría la siguiente unidad producida, y ocurriría lo mismo que en el instante tres, quedando finalmente que habría un espacio desperdiciado de ocho posiciones de pallet, cuatro debidas a los pasillos y cuatro al bloqueo. Se seguiría así sucesivamente cargando un pallet más cada tres instantes de tiempo, la primera descarga se daría en  $t=10$ , y haría que se redujera en uno las posiciones ocupadas pero aumentaría el contador de elementos descargados. Se realiza esto para cada instante hasta que se carguen, almacenen y descarguen los diez pallets del lote.

Como el ritmo de producción es mayor que el de descarga llegará un momento en que se deba recurrir a un segundo carril ( $t=27$ ), comenzando a ocuparse posiciones de este segundo carril y comenzando a contabilizar solo desperdicio por bloqueo producido en este carril (ya que el otro está completo) y desperdicio por pasillos de los dos carriles. Se supone que se da prioridad a la descarga del segundo carril que está incompleto para acabar lo antes posible con el desperdicio en este carril, ya que cuando se vacíe dejara de contabilizar espacio desperdiciado tanto de pasillos como de bloqueo.

Se supone que sólo se producirán las unidades que componen el lote, por tanto no se seguirá produciendo cuando aparezca en la tabla que ya se han producido diez pallets. A partir de este momento ya solo importarán los instantes de descarga de pallets, hasta llegar a los diez pallets descargados.

Cuando ocurre esto se llega al fin de la simulación, se pasará a representar la gráfica que muestra el desperdicio de espacio de almacenamiento en cada instante de tiempo. Una vez obtengamos el área bajo la curva que representa el desperdicio, habrá que dividir por el tiempo de ciclo de inventario, el cual se obtiene restándole al instante final, en el que se descarga el último pallet del lote, el instante en que se produce y almacena el primero (en este caso,  $100-3=97h$ ).

TIEMPO (T)	Pos. Ocupadas	Pos. Bloqueadas	Pos. Pasillo	Pos. Ocupadas (2)	Pos. Bloqueadas (2)	Pos. Pasillo (2)	Dh	Da	D	Elementos Producidos	Elementos Almacenados	Elementos Descargados
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	5	4	0	0	0	5	4	9	1	1	0
6	2	4	4	0	0	0	4	4	8	2	2	0
9	3	3	4	0	0	0	3	4	7	3	3	0
10	2	4	4	0	0	0	4	4	8	3	2	1
12	3	3	4	0	0	0	3	4	7	4	3	1
15	4	2	4	0	0	0	2	4	6	5	4	1
18	5	1	4	0	0	0	1	4	5	6	5	1
20	4	2	4	0	0	0	2	4	6	6	4	2
21	5	1	4	0	0	0	1	4	5	7	5	2
24	6	0	4	0	0	0	0	4	4	8	6	2
27	6	0	4	1	5	4	5	8	13	9	7	2
30	6	0	4	1	5	4	5	8	13	10	7	3
40	6	0	4	0	0	0	0	4	4	10	6	4
50	5	1	4	0	0	0	1	4	5	10	5	5
60	4	2	4	0	0	0	2	4	6	10	4	6
70	3	3	4	0	0	0	3	4	7	10	3	7
80	2	4	4	0	0	0	4	4	8	10	2	8
90	1	5	4	0	0	0	5	4	9	10	1	9
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10

Figura 31: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de  $x=3$  pallets. Fuente: elaboración propia

A continuación con estos datos utilizando los datos de los instantes de tiempo y de el desperdicio total D (suma del desperdicio por “honeycombing” y por pasillos, Dh y Da) se saca el área bajo la curva de desperdicio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario representada en la, que en este caso se obtendría sumando en cada instante los pallets desperdiciados, concretamente en este caso se obtendría un valor de setecientos quince pallets. Ya solo quedaría dividir por el tiempo de ciclo de inventario para llegar al desperdicio promedio de espacio de almacenamiento. Obteniéndose un valor de 7.37 pallets. Ahora se realizará el mismo cálculo para otras profundidades y se verá el espacio desperdiciado.

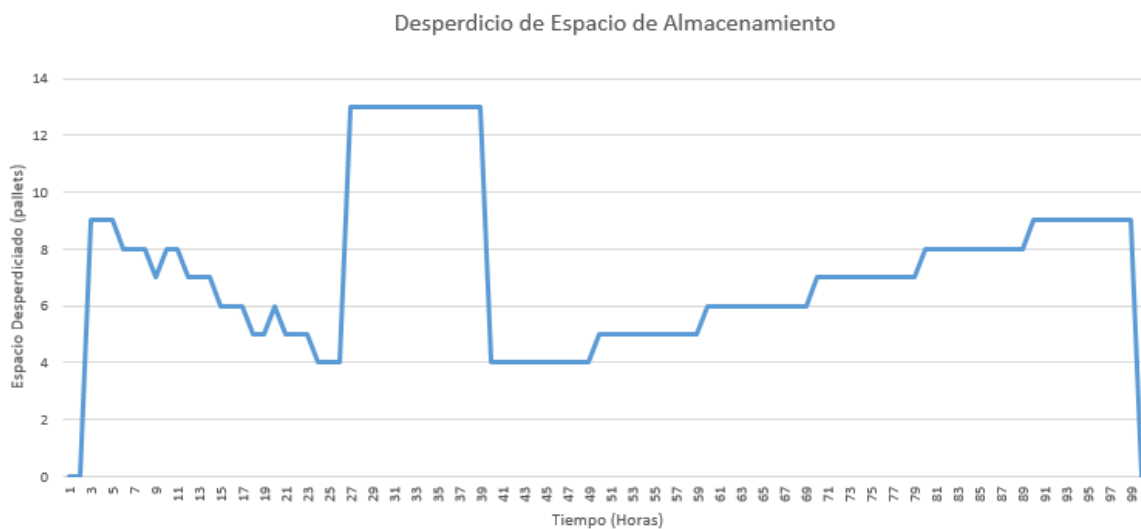


Figura 32: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario. Fuente: elaboración propia

### 4.1.2 Profundidad, $x=2$ pallets

El proceso de cálculo para este caso será idéntico, se comienza a realizar la simulación con los mismos datos iniciales de tiempos de carga, almacenamiento y descarga. Lo que cambiará será la profundidad, en este caso,  $x=2$ . Realizar estos casos por separado es una manera intuitiva de ver el efecto que supone la variación de la profundidad área la optimización del espacio. En la realidad se llevaría a cabo una simulación que iterara y obtuviese la profundidad óptima tal y como se explica en el capítulo anterior.

Se comienza de la misma manera, marcando los instantes en los que varía el estado del o los carriles y se completa la tabla de la misma manera que en el subapartado anterior.

Se observa en la *Figura 33* que las cargas y descargas se producen en los mismos instantes, comienza en  $t=3$  la primera carga, hasta  $t=10$  no se descarga la primera unidad, y así sucesivamente. Pero la diferencia de este escenario respecto al anterior está en que el carril inicial se llena antes, ya que tiene tan solo cuatro unidades, y habrá que comenzar a llenar el segundo carril antes, por lo tanto se estará desperdiciando durante más tiempo espacio para pasillos y por bloqueo.

Como en el caso anterior una vez que se comienza a llenar el segundo carril ( $t=18$ ), se dará prioridad a las unidades correspondientes a este a la hora de ser descargadas, ya que así no se incurre en un mayor desperdicio acumulado.

Como el lote sigue siendo del mismo tamaño (10 pallets), una vez que se lleguen a producir las primeras diez unidades, ya solo interesarían los instantes en los que se produce una descarga, ya que la producción se aparcaría.

Por último habrá que calcular el desperdicio de espacio de almacenamiento acumulado durante el tiempo de ciclo de inventario. Este último se calcula de la misma manera explicada anteriormente y tendría para este caso el mismo valor, ya que las condiciones son prácticamente iguales y los eventos se producen en los mismos tiempos. Habrá que dividir el desperdicio acumulado por el tiempo de ciclo de inventario (T) para obtener finalmente el promedio de espacio desperdiciado.

TIEMPO (T)	Pos. Ocupadas	Pos. Bloqueadas	Pos. Pasillo	Pos. Ocupadas (2)	Pos. Bloqueadas (2)	Pos. Pasillo (2)	Dh	D	Elementos Producidos	Elementos Almacenados	Elementos Descargados
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	3	4	0	0	0	3	4	7	1	0
6	2	2	4	0	0	0	2	4	6	2	0
9	3	1	4	0	0	0	1	4	5	3	0
10	2	2	4	0	0	0	2	4	6	3	1
12	3	1	4	0	0	0	1	4	5	4	1
15	4	0	4	0	0	0	0	4	4	5	1
18	4	0	4	1	3	4	3	8	11	6	1
20	4	0	4	0	0	0	0	4	4	6	2
21	4	0	4	1	3	4	3	8	11	7	2
24	4	0	4	2	2	4	2	8	10	8	2
27	4	0	4	3	1	4	1	8	9	9	2
30	4	0	4	3	1	4	1	8	9	10	3
40	4	0	4	2	2	4	2	8	10	10	4
50	4	0	4	1	3	4	3	8	11	10	5
60	4	0	4	0	0	0	0	4	4	10	6
70	3	1	4	0	0	0	1	4	5	10	7
80	2	2	4	0	0	0	2	4	6	10	8
90	1	3	4	0	0	0	3	4	7	10	9
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10

*Figura 33: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de  $x=2$  pallets. Fuente: elaboración propia.*

A partir de los datos de la columna de “D”, que representa el desperdicio total de espacio de almacenamiento en cada instante, se realiza una gráfica que represente de manera continua en cada instante del tiempo el valor que tendría este parámetro “D”. Una vez queda representada como en la

Figura 34 se calcula el área bajo esta curva y se obtiene al dividir este por el tiempo de ciclo de inventario, el valor promedio en pallets de desperdicio de espacio para almacenar. En este caso concreto se obtendría un desperdicio acumulado a lo largo de T de setecientos diecinueve pallets y como T vale noventa y siete. Se obtiene un desperdicio promedio de espacio de 7.41 pallets.

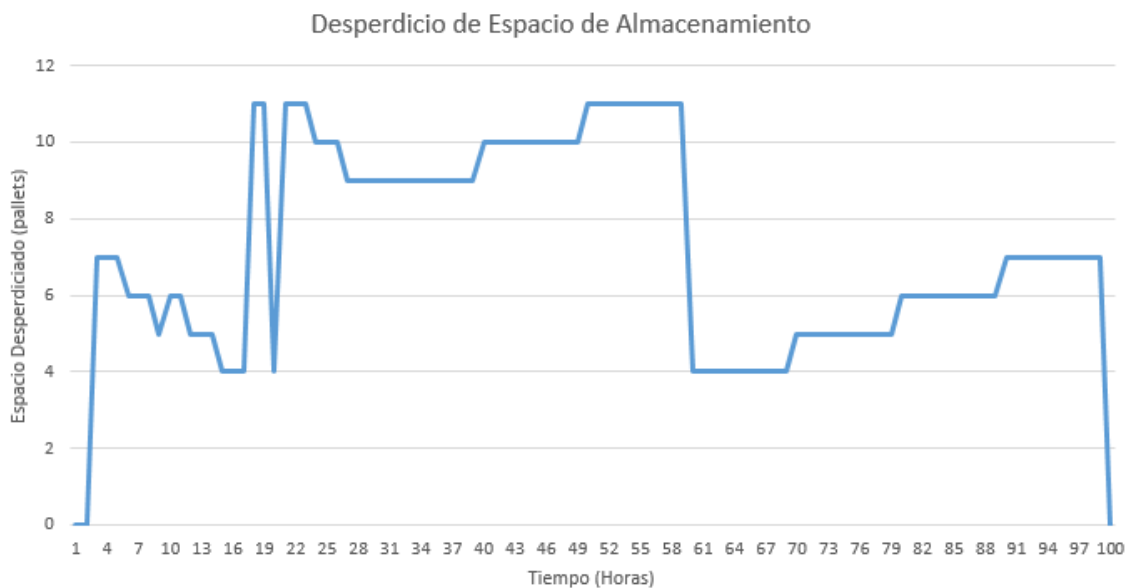


Figura 34: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario( $x=2$ ). Fuente: elaboración propia

Se observa que al funcionar más tiempo dos carriles, aunque estos desperdicien menos posiciones porque son de menor dimensión, se desperdicia más espacio que con el caso de profundidad equivalente a tres pallets. A continuación se completan otros dos ejemplos para observar como seguiría cambiando el desperdicio promedio con la profundidad.

#### 4.1.3 Profundidad, $x=1$ pallet

Este caso es un caso representa un límite inferior al estudio realizado para este escenario y se simulará de la misma manera que los anteriores, con el inconveniente que ahora se llenarán más de dos carriles, porque estos tan solo tienen capacidad para dos pallets.

La fisonomía de la tabla cambiará sustancialmente aunque se representarán los mismos valores, habrá que ampliarla para completar varios carriles más.

En la Figura 35 se presenta la simulación que, de la misma manera que en los casos anteriores, tiene los mismos tiempos para los eventos, con la salvedad de que ahora hará falta añadir más carriles. Concretamente harán falta un total de cuatro carriles para completar el lote de diez pallets con los ritmos



de producción y descarga establecidos. En  $t=9$  comenzaría a llenarse el segundo carril, que se vaciaría hasta  $t=12$ , porque en  $t=10$  se produce la primera descarga; y como se ha dicho antes tendrán prioridad en descargar os carriles que no estén completamente llenos. En  $t=18$  se comenzaría a cargar en el tercer carril y ocurriría lo mismo que en el segundo, ya que en  $t=20$  se comenzaría a descargar el segundo pallet y este carril se vaciaría para comenzar a llenarse de nuevo en  $t=21$ . Y en  $t=27$  se comenzaría a llenar el cuarto carril, pero como esta unidad introducida sería la novena producida y en  $t=30$  se carga y descarga, el carril se quedaría igual y ya no se produciría más. A partir de ese momento solo importarían los instantes múltiplos de diez, en los que se descarga, hasta agotar las unidades de los cuatro carriles en  $t=100$ .

TIEMPO (T)	Oc(1)	Blq(1)	Pas(1)	Oc(2)	Blq(2)	Pas(2)	Oc(3)	Blq(3)	Pas(3)	Oc(4)	Blq(4)	Pas(4)	Dh	Da	D	Elem Prod	Elem Alm	Elem Desc
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	1	1	0
6	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	2	2	0
9	2	0	4	1	1	4	0	0	0	0	0	0	1	8	9	3	3	0
10	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	3	2	1
12	2	0	4	1	1	4	0	0	0	0	0	0	1	8	9	4	3	1
15	2	0	4	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	8	8	5	4	1
18	2	0	4	2	0	4	1	1	4	0	0	0	1	12	13	6	5	1
20	2	0	4	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	8	8	6	4	2
21	2	0	4	2	0	4	1	1	4	0	0	0	1	12	13	7	5	2
24	2	0	4	2	0	4	2	0	4	0	0	0	0	12	12	8	6	2
27	2	0	4	2	0	4	2	0	4	1	1	4	1	16	17	9	7	2
30	2	0	4	2	0	4	2	0	4	1	1	4	1	16	17	10	7	3
40	2	0	4	2	0	4	2	0	4	0	0	0	0	12	12	10	6	4
50	2	0	4	2	0	4	1	1	4	0	0	0	1	12	13	10	5	5
60	2	0	4	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	8	8	10	4	6
70	2	0	4	1	1	4	0	0	0	0	0	0	1	8	9	10	3	7
80	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	10	2	8
90	1	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	10	1	9
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10

Figura 35: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de  $x=1$  pallet.  
Fuente: elaboración propia.

De nuevo a partir del desperdicio acumulado en la columna D se saca el desperdicio total acumulado para todos los instantes de tiempo, no solo los tiempos en los que ocurren cambios en el estado del almacén (Figura 36). Este valor acumulado resulta para estas condiciones de novecientos treinta y cinco pallets de espacio desperdiciados a lo largo del tiempo de ciclo de inventario.



Figura 36: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario ( $x=1$ ). Fuente: elaboración propia

Tras dividir el desperdicio acumulado entre el tiempo de ciclo de inventario ( $T=97$ ), se obtiene un desperdicio promedio de espacio de almacenamiento de 9.64 pallets. Por tanto se puede observar que disminuir la profundidad de las estanterías en un almacén puede perjudicar, ya que se incurre mucho en gasto en huecos de pasillo por cada carril, lo cual hace que el desperdicio se dispare.

Por último se presenta el caso límite por encima que terminaría de delimitar el rango óptimo de valores entre los que se movería  $x$  (profundidad).

#### 4.1.4 Profundidad, $x=4$ pallets

Este tal y como se ha adelantado en el subapartado anterior será el límite superior de la región óptima de valores de  $x$  para este caso, esto quiere decir que a partir de este valor el desperdicio comienza a dispararse y a ni si quiera ser considerado como una opción, al igual que pasa con  $x=1$ , caso anteriormente expuesto.

De nuevo la simulación sigue el mismo procedimiento que los casos anteriores pero con la diferencia de que ahora se intentarán llenar carriles de cuatro pallets de profundidad.

En la *Figura 37* se puede observar cómo se llevaría a cabo el llenado de los carriles representando los instantes en los que se producen cambios, que serían los mismos que en los anteriores subapartados. En  $t=3$  comenzaría a llenarse el primer carril, pero al tener capacidad para ocho pallets y teniendo que producir solo diez, es inmediato pensar que mientras que cuando voy a producir el noveno pallet se haya descargado al menos un pallet y que cuando voy a producir el décimo se hayan descargado dos, valdrá con un solo carril para almacenar y dar servicio al cliente en estas condiciones. Esto ocurre porque si cada tres instantes de tiempo se produce un pallet y se descarga cada diez, en producir ocho se tardaría veinticuatro unidades de tiempo y en  $t=20$  ya se habrían descargado dos pallets. Por tanto se demuestra que con un solo carril se cumplen las condiciones expuestas.

TIEMPO (T)	Pos. Ocupadas	Pos. Bloqueadas	Pos. Pasillo	Pos. Ocupadas (2)	Pos. Bloqueadas (2)	Pos. Pasillo (2)	Dh	Da	D	Elementos Producidos	Elementos Almacenados	Elementos Descargados
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	7	4	0	0	0	7	4	11	1	1	0
6	2	6	4	0	0	0	6	4	10	2	2	0
9	3	5	4	0	0	0	5	4	9	3	3	0
10	2	6	4	0	0	0	6	4	10	3	2	1
12	3	5	4	0	0	0	5	4	9	4	3	1
15	4	4	4	0	0	0	4	4	8	5	4	1
18	5	3	4	0	0	0	3	4	7	6	5	1
20	4	4	4	0	0	0	4	4	8	6	4	2
21	5	3	4	0	0	0	3	4	7	7	5	2
24	6	2	4	0	0	0	2	4	6	8	6	2
27	7	1	4	0	0	0	1	4	5	9	7	2
30	7	1	4	0	0	0	1	4	5	10	7	3
40	6	2	4	0	0	0	2	4	6	10	6	4
50	5	3	4	0	0	0	3	4	7	10	5	5
60	4	4	4	0	0	0	4	4	8	10	4	6
70	3	5	4	0	0	0	5	4	9	10	3	7
80	2	6	4	0	0	0	6	4	10	10	2	8
90	1	7	4	0	0	0	7	4	11	10	1	9
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10

Figura 37: Simulación para el cálculo de la utilización del espacio para una profundidad de  $x=4$  pallets. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la simulación que se desperdiciará un número elevado de huecos para pallets mientras el carril este poco cargado. A diferencia de cuando la profundidad era de un pallet y se incurría en un elevado desperdicio por pasillos en este caso el desperdicio será mayor por “honeycombing” y penalizará mucho la optimización del espacio de almacenamiento. Estas observaciones expuestas se pueden apreciar mejor en la siguiente gráfica de la Figura 38 dónde aparece el desperdicio a lo largo de cada instante del tiempo de ciclo de inventario.

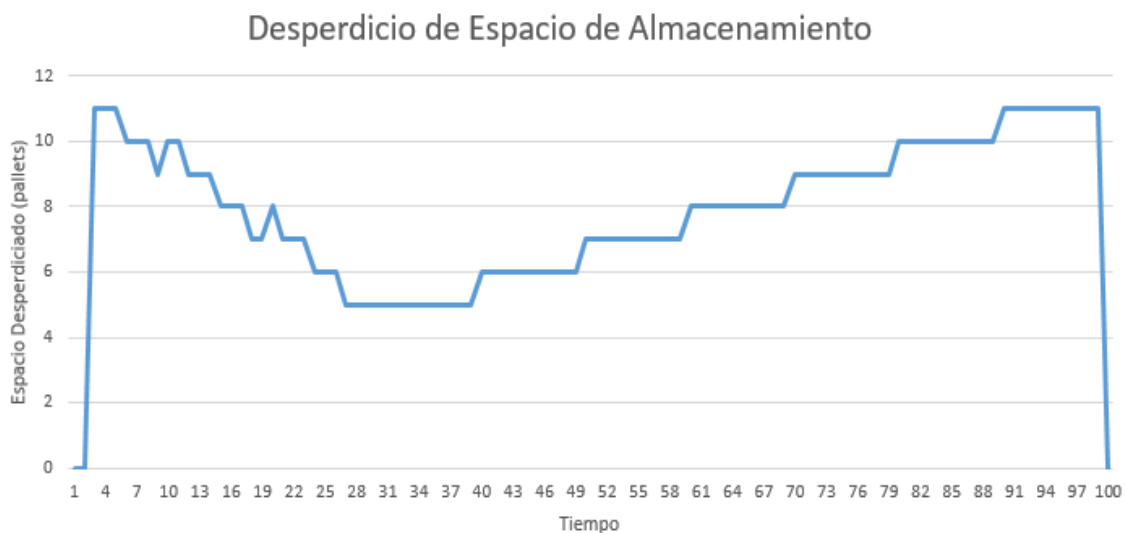


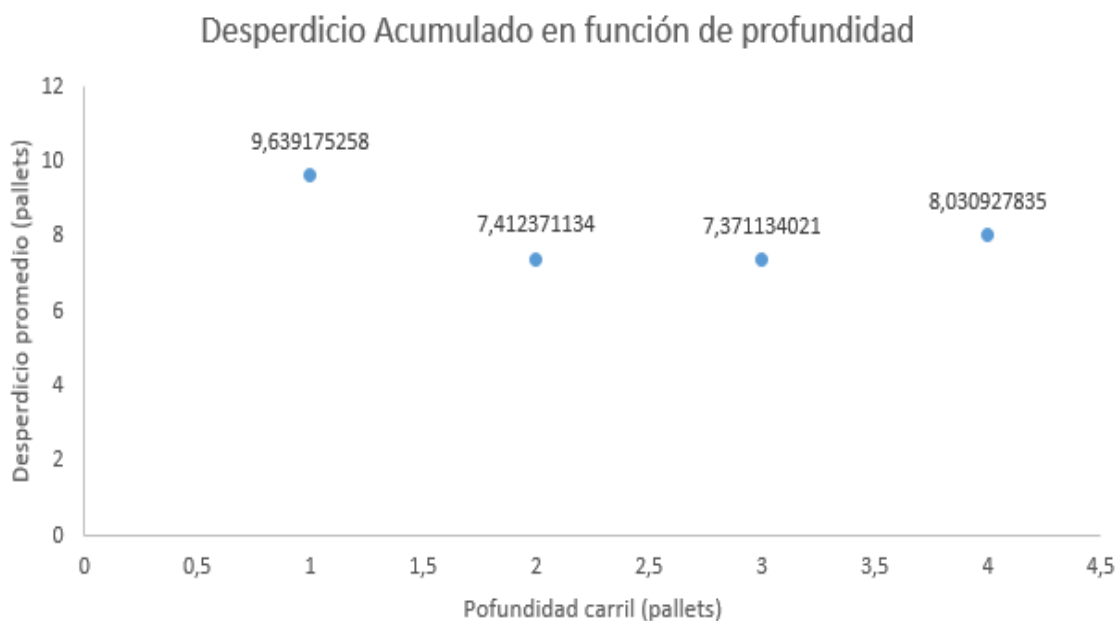
Figura 38: Gráfica de desperdicio de espacio a lo largo del tiempo de ciclo de inventario( $x=4$ ). Fuente: elaboración propia

Si se calcula el desperdicio acumulado se obtiene que vale setecientos setenta y nueve pallets, y dividiendo por el tiempo de ciclo de inventario se llega a un desperdicio promedio con estas condiciones de 8.03 pallets.

### 4.1.5 Comparación de datos

En este pequeño subapartado solo se van a exponer de manera conjunta los resultados obtenidos en los anteriores subapartados para dar una idea de la tendencia que seguiría el desperdicio promedio dependiendo de la profundidad de los carriles. Las conclusiones se sacarán en el capítulo siguiente, realizado expresamente para ello.

Se presenta en la *Figura 39* un gráfico que representa los puntos y muestra que el valor óptimo para este caso sería elegir una profundidad de tres pallets para compensar el desperdicio tanto por bloqueo como por uso de pasillos para posibilitar la maniobra de operarios y maquinaria de manutención.



*Figura 39: Gráfico comparativo desperdicio promedio respecto a diferentes profundidades. Fuente: elaboración propia*

Para este caso concreto no es demasiado grande la diferencia entre el valor óptimo (3 pallets de profundidad) y el valor que le sigue en orden de optimalidad. Pero esa pequeña diferencia cuando se aplica a un gran almacén dónde no hay un carril si no que habrá cientos de ellos, esa pequeña diferencia puede traducirse en un gran beneficio en términos de ahorro. Por tanto se llega a final de fase I con el valor óptimo obtenido para este caso en  $x=3$  pallets de profundidad.

## 4.2 Fase II. Aplicación de cálculo para el método de almacenamiento de alta densidad

Para particularizar este método hay que tener en cuenta varias variables, el resultado dependerá de las dimensiones de la zona de almacenamiento ( $i$ ,  $j$ ) y del coeficiente de densidad  $k$  del método, que será equivalente a la profundidad de los carriles. Si  $k=3$  los carriles tendrían triple profundidad. Este método asegura minimizar las reubicaciones, lo cual será muy útil cuando las haya, pero en este caso concreto se supondrá que las cargas son homogéneas y no trabajará con numerosas SKUs.

Como se explicó en el apartado 3.1 estas regiones estarán definidas por  $i$  y por  $j$  considerando que la cuadrícula diseñada está compuesta por elementos o posiciones del mismo tamaño, y por tanto  $j$  e  $i$  serán el número de posiciones de este tipo que ocupan el ancho y el largo de la región. Sabiendo que en este método  $j$  será menor o igual que  $i$ .

Como un único método de diseño de almacenamiento se parte del caso óptimo obtenido en el apartado anterior,  $x^*=3$  pallets, y tan solo se tendría que suponer el tamaño o las dimensiones de la zona de almacén. Para abarcar una región más amplia de soluciones y poder alcanzar una mejor solución se mostrarán varias configuraciones para distintas dimensiones de la zona de almacenamiento.

Kevin R. (2005) afirmó, después de un estudio completo de las diferentes dimensiones del almacén, las distribuciones óptimas para este se darán para unos valores  $i$  que sean iguales o cercanos a múltiplos de  $(2k + 1)$  se comenzará por un valor de  $i = 21$ , porque es múltiplo de siete  $[(2 \times 3) + 1]$ . Y se mostrarán las distribuciones para diferentes valores de  $j$ , siempre menores que los de  $i$ .

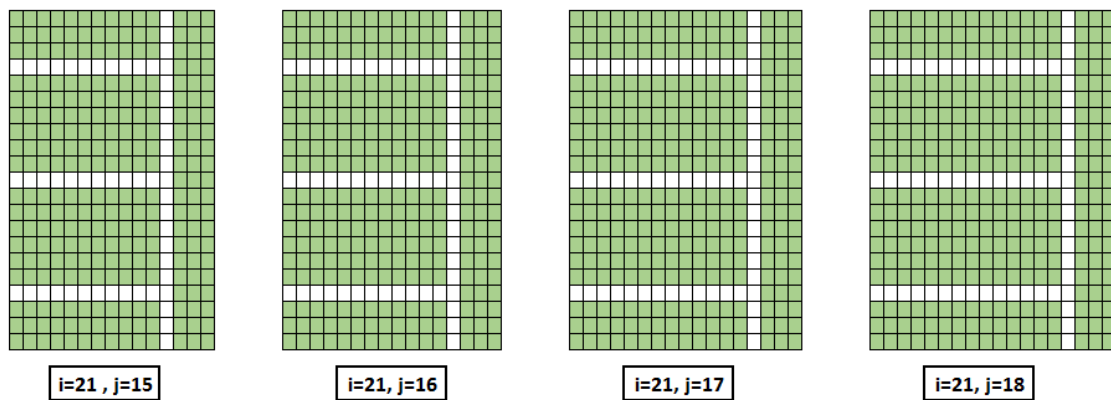


Figura 40: Resultados para  $i=21, j= [15...18]$ . Fuente: elaboración propia

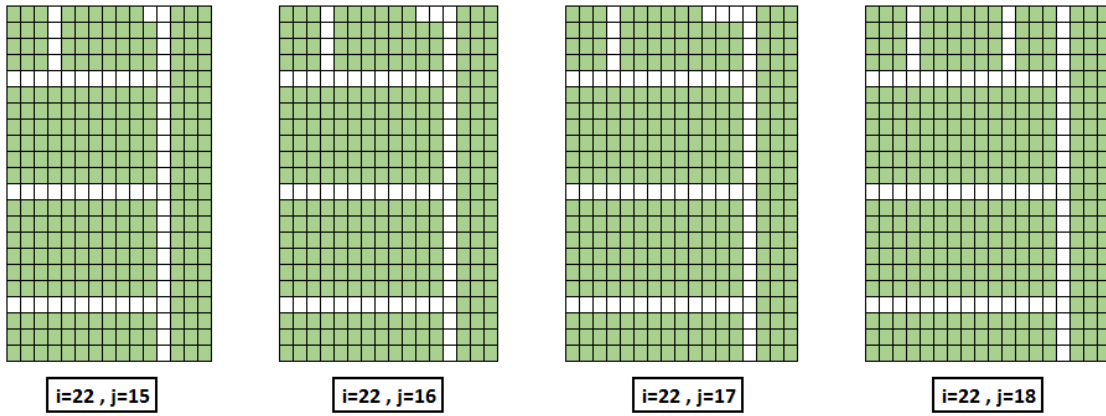


Figura 41: Resultados para  $i=22, j= [15...18]$ . Fuente: elaboración propia

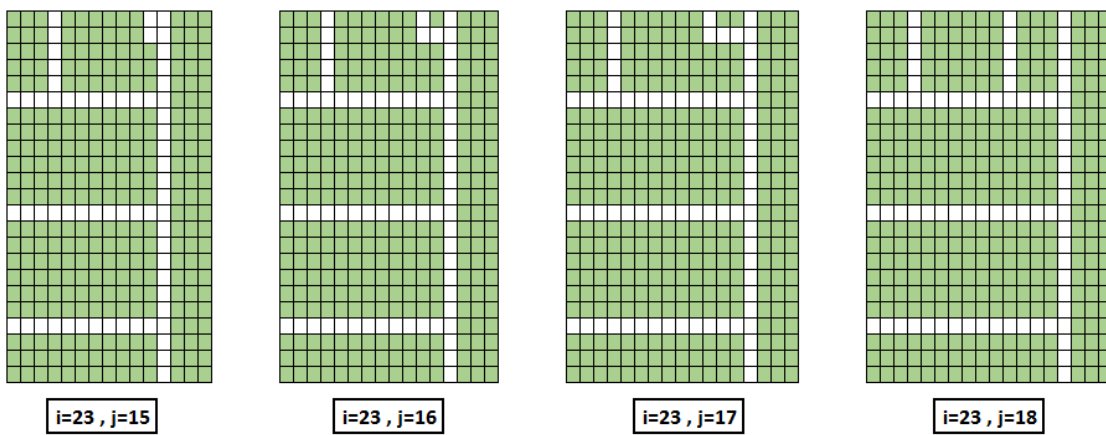


Figura 42: Resultados para  $i=23, j= [15...18]$ . Fuente: elaboración propia

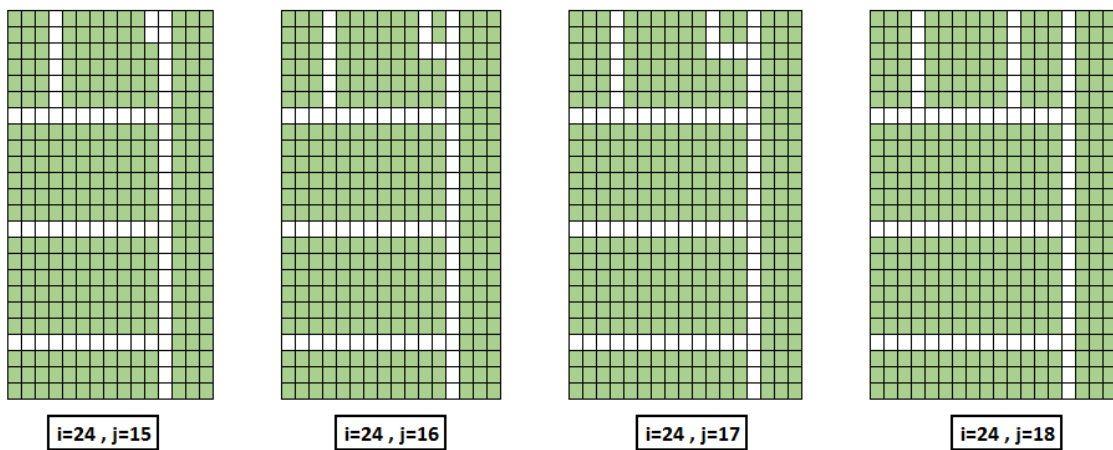


Figura 43: Resultados para  $i=24, j= [15...18]$ . Fuente: elaboración propia

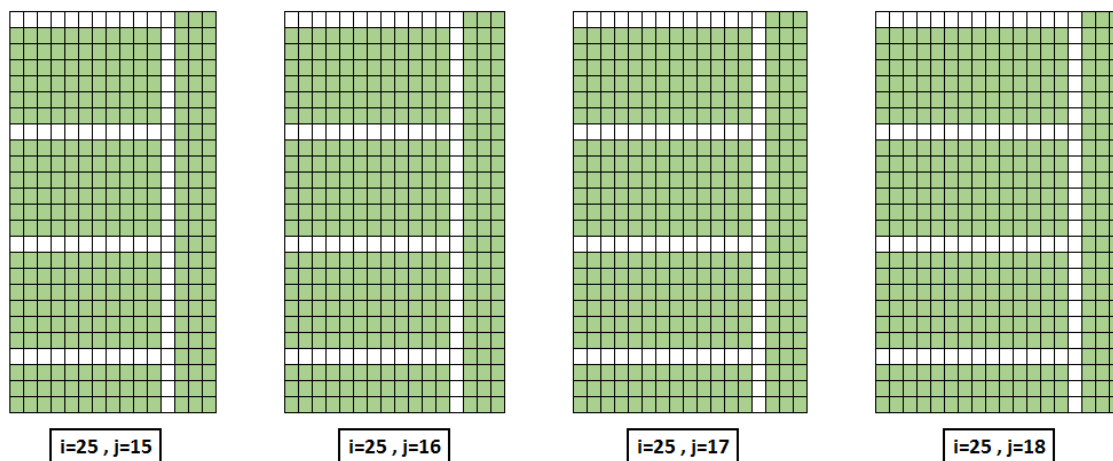


Figura 44: Resultados para  $i=25, j = [15..18]$ . Fuente: elaboración propia

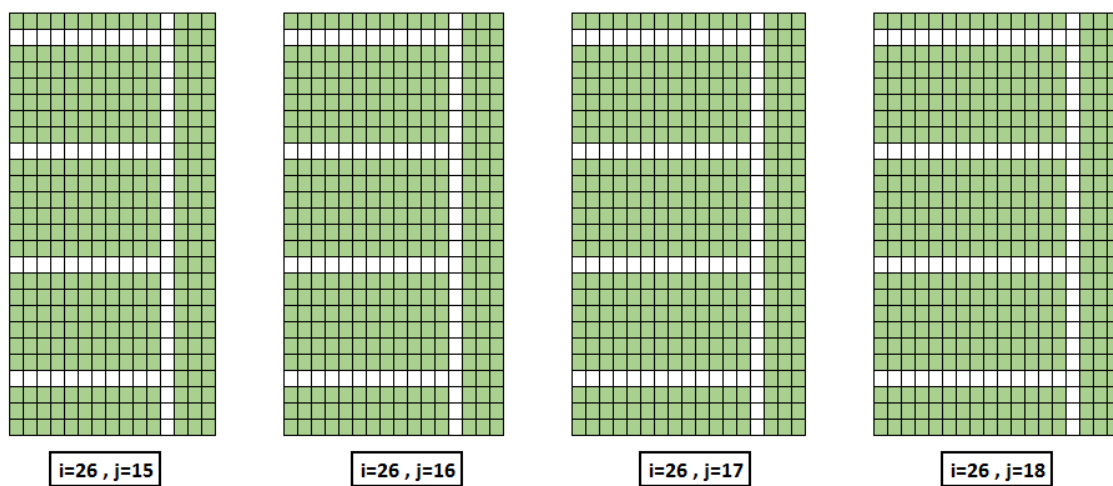


Figura 45: Resultados para  $i=26, j = [15..18]$ . Fuente: elaboración propia

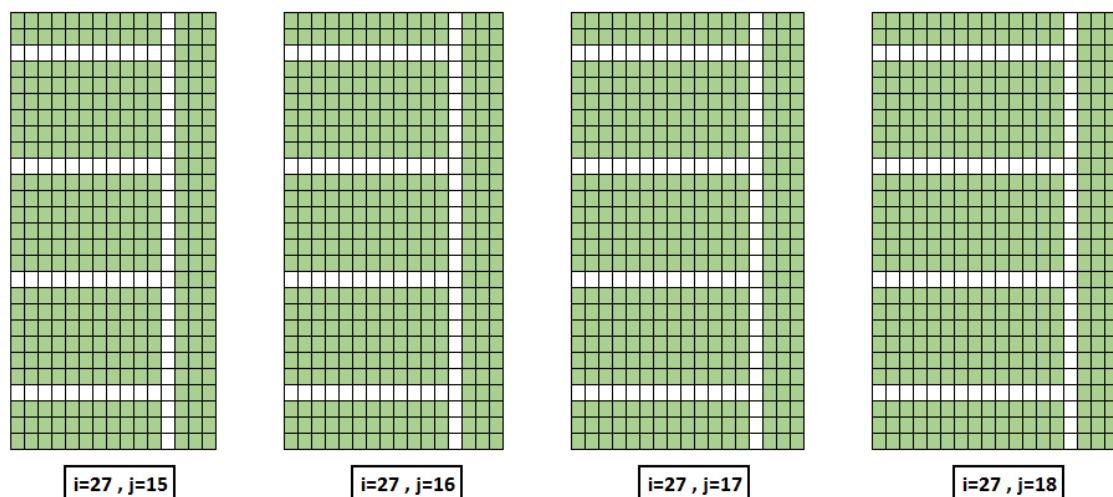


Figura 46: Resultados para  $i=27, j = [15..18]$ . Fuente: elaboración propia

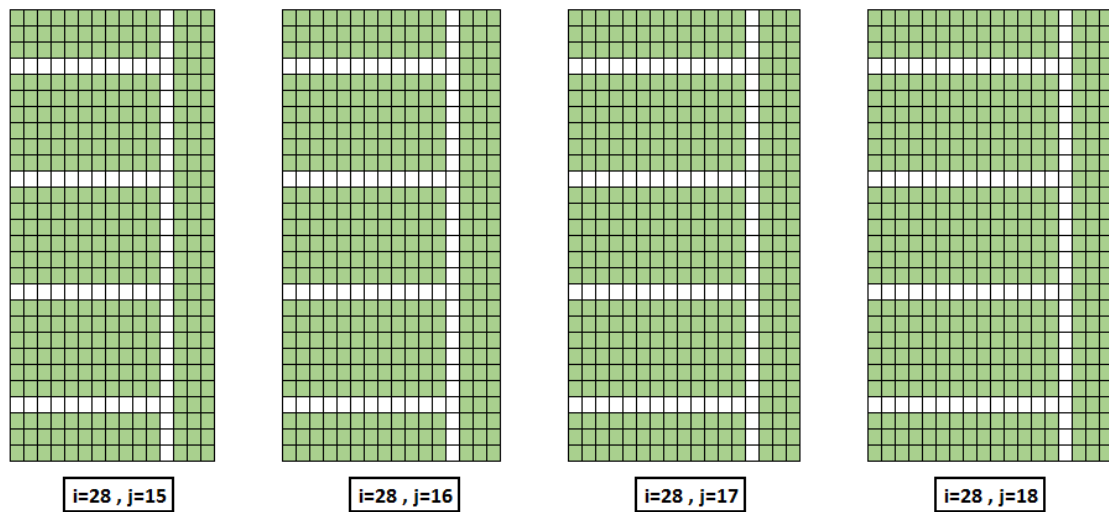


Figura 47: Resultados para  $i=28, j= [15...18]$ . Fuente: elaboración propia

Como se observa en las anteriores figuras las distribuciones son más regulares a medida que la dimensión de su largo está cerca de múltiplo de siete, concretamente será para  $i=21$  y en  $i=28$  cuando se alcancen las distribuciones más regulares, el resto de ellas serán menos regulares o menos eficientes en términos de densidad por los siguientes hechos. Algunas tienen posiciones de pasillos que solo sirven para acceder a posiciones de almacenamiento en una dirección por tanto desperdician el pasillo, y otras solo sirven para acceder a una o dos posiciones en lugar de acceder a tres en profundidad que sería lo eficiente.

Con respecto a la anchura (dimensión  $j$ ) a medida que aumenta esta la densidad aumenta también porque no añadiría pasillos a la estructura en las zonas regulares y en algunos casos como en la *Figura 41*, *Figura 42* o la *Figura 43* el aumento de la anchura aportaría regularidad al sistema.

Por tanto para tomar una decisión acertada para este caso concreto y elegir la mejor opción se debería elegir, según las necesidades de la empresa o del espacio del que se disponga para la zona de reserva (información de la que no se dispone), unas dimensiones de un largo que sea múltiplo de siete, es decir veintiuno o veintiocho posiciones de largo y de ancho un valor alto si fuera posible según las condiciones de espacio. En este caso se supone que se dispone de suficiente espacio y se elige la distribución de  $28 \times 18$  llegándose así a un nivel de densidad elevado. Además de asegurar una correcta utilización de los carriles por haber aplicado el método de optimización de la profundidad de estos.

Con todo esto se habría llegado al final del diseño de un almacén a partir de unos datos de tasas de producción y de descarga, de altura de estanterías, de espacio disponible para la zona de reserva, de anchura de pasillos y el resto de condiciones presentadas en esta aplicación práctica. Así se intenta demostrar que es interesante llevar a cabo este diseño dividido en fase I y fase II, para conseguir una mayor optimización del espacio de almacenamiento.



## 5 CONCLUSIONES

Después de llevar a cabo la revisión de los tres métodos presentados en este trabajo se han sacado conclusiones de cada método individualmente y de las condiciones en las que sería más apropiado usar uno u otro para llevar a cabo un correcto diseño de la zona de almacenamiento. Además de estas, también se ha llegado a la conclusión de que sería beneficioso, tal y como se ha explicado en capítulos anteriores y se expone a continuación, realizar un diseño en dos fases del almacén.

Para el método de diseño de alta densidad, tras la revisión llevada a cabo de diferentes artículos que exponen esta metodología, se puede afirmar que esta será válida para sistemas que busquen almacenar un gran volumen de productos aunque no con demasiada variedad de referencias. Se llega a una sección con unas dimensiones óptimas para conseguir la mayor regularidad posible. Por tanto se considera un método apropiado cuando se tengan necesidades altas de almacenamiento y no haya una excesiva restricción en cuanto a dimensiones del almacén, para poder elegir la mejor distribución posible y así llegar a los máximos valores de densidad de almacenamiento. Concretando algo más se puede afirmar que se obtendrán las dimensiones óptimas para una dimensión de largo para la zona de almacén equivalente a  $2k+1$ ; debido a que estas dimensiones harán que se distribuyan mejor los carriles de profundidad  $k$  dando una mejor utilización a los pasillos. Habrá que tener en cuenta que este método tendrá unos límites de densidad obtenida, por ejemplo para profundidad doble un máximo de  $4/5$ .

Tras observar el funcionamiento del algoritmo genético para el método del apilamiento en altura en el que se busca principalmente minimizar las reubicaciones debido al alto coste que suponen. Se llega a la conclusión de que este método se sale del alcance de este trabajo y por tanto no se entra en demasiada profundidad, únicamente se explica el procedimiento que seguiría el algoritmo genético. Tan solo se puede decir que aunque el coste en tiempo de elaboración de un algoritmo genético particularizado a un problema concreto será elevado aportará una solución que no tendrá por qué ser óptima, ya que se obtiene de una heurística. El hecho de poseer esta información puede hacer disminuir mucho el número de relocalizaciones y llegar a una mejor solución.

En el caso del tercer método expuesto se considera que tras revisar el procedimiento utilizado para calcular la profundidad óptima de los carriles dependiendo de los valores de los ratios de producción, ya sea finita o infinita y mayor o menor que la demanda, cuya tasa también vendrá determinada; se puede afirmar que con este método se obtendrán distribuciones más flexibles que disminuirán las distancias medias recorridas por los elementos de manutención aunque añadan pasillos que crucen la zona de almacenamiento. La optimización de la profundidad de línea dependiendo de las tasas de producción y de demanda se puede maximizar y optimizar el uso del espacio de almacenamiento.

Por último y como conclusión más importante de este trabajo se llega a poder afirmar que una estrategia acertada para el diseño de almacenes sería ejecutar un primer cálculo de la profundidad óptima de los carriles de las estanterías, conociendo datos como la tasa de demanda y producción, y la altura de apilamiento entre otros. A este paso se le ha llamado fase I, al final de esta etapa, se conoce la profundidad que deben tener las líneas dependiendo de las condiciones, y se usará este resultado de fase I como dato inicial de la fase II. Esta segunda etapa partiría de la necesidad de diseñar una zona de almacenamiento conociendo la profundidad de los carriles ( $x$  en fase I y  $k$  en fase II) y tras elegir unas dimensiones que optimizaran la regularidad de la zona destinada a almacenar, se llevaría a cabo la implementación del algoritmo de rotación y llenado para llegar así a la distribución ideal para la zona de almacenamiento. Esta metodología puede ser interesante para sistemas cuyas condiciones permitan la aplicación de ambos métodos sin incurrir en ninguna irregularidad.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Alegre Pereira Alba (2013). Trabajo almacenaje. <http://grupo7almacenaje.blogspot.com>
- Alguero José Miguel (2015). NTP 253: Puente grúa. Instituto nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
- Ángeles, M<sup>a</sup> (2012). Transporte y Logística. <https://logisticabroz.com>
- Anónimo (2007). Mecalux News, electrovías. [www.mecalux.com](http://www.mecalux.com)
- Anónimo (2008). Transpaletas Eléctricas. SPM Consebro, Gobierno de Navarra.
- Anónimo (2015). Algoritmos Genéticos. Universidad del País Vasco.
- Bartholdi, John J. 2014. ANote on the Most Space-efficient Lane-depth for Block-stacked Pallets. Private Note.
- Bassan, Y., Roll, Y., and Rosenblatt, M. J. (1980). Internal Layout Design of a Warehouse. IIE Transactions, 12(4):317–322.
- Caserta, M., Voss, S., Sniedovich, M., 2010. Applying the corridor method to a blocks relocation problem. OR Spectrum, <http://dx.doi.org/10.1007/s00291.009.0176.5>.
- Castilho B., Daganzo, C.F. (1993). Handling strategies for import containers at maritime terminals. Transp. Research Part B 27 (2), 151–166.
- Castorena, J.M. (2015). El ingeniero industrial en un sistema de almacén. [www.monografias.com](http://www.monografias.com)
- Davis, L. (ed.) (1991). Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Echevarri, J.M. y Escobar, P.A. (2013). Caracterización de un AGV (Vehículo guiado automáticamente). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Frazelle, E. H. (2002). World-Class Warehousing and Material Handling. McGraw Hill, New York, New York.
- Goldberg, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search. Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Reading, MA.
- Guerola, S. (2011). 5 formas de reducir costes a través de la logística . <http://docplayer.es>
- Heragu, S. (1997). Facilities Design. PWS Publishing Company, Boston, Massachusetts, first edition.
- Holland, J. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Hudock, Brian. (1998). Warehouse Space and Layout Planning. In The Warehouse Management Handbook. edited by James A. Tompkins and Jerry D. Smith, 2nd ed. 229–253. Raleigh: Tompkins Press.
- Iglesias, A.L. (2015). La logística no estodo, pero esta en todo. <https://logispyme.wordpress.com>
- Jang, Dong-Won, Se Won Kim, and Kap Hwan Kim. (2013). The Optimization of Mixed Block Stacking Requiring Relocations. International Journal of Production Economics 143 (2): 256–262.
- Kevin R. Gue (2005). Very High Density Storage Systems. Departement of Industrial Systems Eengineering.
- Kim, K.H., Hong, G.P. (2006). A heuristic rule for relocating blocks. Computers & Operations Research 33 (4), 940–954.

- Kim, K.H. (1997). Evaluation of the number of rehandles in container yards. *Computers & Industrial Engineering* 32 (4), 701–711.
- Kim, K. H. and Park, K. T. (2003). A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operational Research*, 148:92–101.
- Kim, K.H., Park, Y.M., Ryu, K.R. (2000). Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operation Research* 124 (1), 89–101.
- Kind, D.A. (1975). Elements of Space Utilization. *Transportation and Distribution Management* 15: 29–34.
- Larrañeta, J.C. , Onieva, L. (1988). Métodos modernos de gestión de la producción. Alianza Univrsidad.
- Matson, J. O. (1982). The Analysis of Selected Unit Load Storage Systems. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Michalewicz, Z. (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, SpringerVerlag, Berlin Heidelberg.
- Muñuzuri, J. (2016). *Logística. Apuntes de asignatura (GITI)*.
- Park, T.-K., Kim, K.H. (2010). Comparing handling and space costs for various types of stacking methods. *Computers & Industrial Engineering* 58 (3), 501–508.
- Petering, Matthew E.H. and Mazen I. Hussein. (2013). A New Mixed Integer Program and Extended Look-ahead Heuristic Algorithm for the Block Relocation Problem. *European Journal of Operational Research* 231 (1): 120–130.
- Reeves, C. (1993). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Blackwell Scientific Publications.
- Salinero, M. (2013). Diseño de una banda transportadora mediante guide de Matlab. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid (Ingeniería Industrial).
- Shahab Derhami, Jeffrey S. Smith & Kevin R. Gue (2016). Optimising space utilisation in block stacking warehouses, *International Journal of Production Research*.
- Tamborero, J.M<sup>a</sup> (2015). NTP 214: Carretillas elevadoras. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Urzelai, A. (2006). *Manual básico de logística integral*. Editorial Díaz de Santos.
- Van den Berg, Jeroenp (1999). A Literature Survey on Planning and Control of Warehousing Systems. *IIE Transactions* 31 (8): 751–762.
- Watanabe, I.R. (1991). Characteristics and analysis method of efficiencies of container terminal an approach to the optimal loading/unloading method. *Container Age*, 36–47.
- Zhang, C., Chen, W., Shi, L., Zheng, L. (2010). A note on deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operational Research* 205, 483–485.



