

DISEÑO DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN ÓPTIMO PARA UN ÁREA DE
ALMACENAMIENTO DE OPERACIÓN MANUAL BASADO EN LA
ESTRATEGIA “FORWARD RESERVE”

DAVID ESTEBAN PUENTES GARZÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA

2016

DISEÑO DE UN MODELO DE DISTRIBUCIÓN ÓPTIMO PARA UN ÁREA DE
ALMACENAMIENTO DE OPERACIÓN MANUAL BASADO EN LA
ESTRATEGIA “FORWARD RESERVE”

DAVID ESTEBAN PUENTES GARZÓN

Trabajo de grado para optar por el título de:
Ingeniero Industrial

Director

EDWIN ALBERTO GARAVITO HERNÁNDEZ
Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA

2016

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Edwin Alberto Garavito Hernández por guiarme y apoyarme en el desarrollo del presente proyecto, por su comprensión y paciencia ante las situaciones presentadas.

A Daniel Orlando Martínez Quezada por sus consejos y apoyo para sobrellevar las dificultades encontradas a lo largo de la investigación.

A Silvia Alejandra Cepeda García quien con su amor y ternura me ha acompañado en esta etapa tan significativa de mi vida.

A familiares y amigos quienes confiaron y me apoyaron en mi formación profesional y personal, en especial a Laura Cristina Cepeda quien ha sido mi compañera y amiga.

DEDICATORIA

Dedico ante todo este trabajo a Dios por darme la sabiduría, fortaleza e inteligencia para permitirme alcanzar esta meta

A mis padres Baltazar y Ofelia porque siempre me han brindado amor y han creído en mí, por darme la oportunidad de formarme como Ingeniero.

A mi hermano Andrés Felipe quien a su manera me ha apoyado y dado consejos para formarme como persona, quien ha sabido ser mi mejor amigo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS Y ALCANCE	21
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3.3 ALCANCE	21
4. REVISIÓN DE LA LITERATURA	22
4.1 ASIGNACIÓN DE LUGARES: FORWARD-RESERVE PROBLEM.....	22
4.2 DISEÑO DE ALMACENES.....	25
5. MARCO TEÓRICO	33
5.1 OPERACIONES EN LOS ALMACENES.....	33
5.1.1 Definición de almacén.....	33
5.1.2 Objetivos del almacenamiento.	34
5.1.3 Funciones del almacén.	34
5.2 DISEÑO DE ALMACENES.....	47
5.2.1 Zonas de Carga y Descarga.	49
5.2.2 Zona de almacenaje.	51
5.2.3 Zona de alistamiento de pedidos.	54
6. FORMULACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	56
6.1 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS VERTICALES.....	59
6.2 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS HORIZONTALES	67
6.3 MODELO DE DISTRIBUCIÓN CON ÁREA CENTRAL.....	70
7. APLICACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	74
7.1 CÁLCULO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.....	74
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
8. DISEÑO EXPERIMENTAL	92
9. CONCLUSIONES.....	112
10. RECOMENDACIONES.....	114

BIBLIOGRAFÍA.....115
ANEXOS122

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Cumplimiento de Objetivos	17
Tabla 2. Grado de eficacia de los sistemas de almacenamiento.....	53
Tabla 3. Parámetros de operación.....	74
Tabla 4. Dimensiones óptimas modelo 1	76
Tabla 5. Variación en las dimensiones del modelo 1	77
Tabla 6. Dimensiones óptimas modelo 2	78
Tabla 7. Comparación de modelos de distancias recorridas	80
Tabla 8. Comparación de recorridos del modelo 1 y 2	80
Tabla 9. Variación en las dimensiones del modelo 2	81
Tabla 10. Dimensiones óptimas modelo 3	83
Tabla 11. Variación en las dimensiones del modelo 3	83
Tabla 12. Media y desviación estándar del costo del ciclo de vida del almacén.....	85
Tabla 13. Pruebas de hipótesis sobre el costo del ciclo de vida del almacén.....	86
Tabla 14. Media y desviación estándar del área total	88
Tabla 15. Pruebas de hipótesis sobre el área total	88
Tabla 16. Media y desviación estándar del costo de operación	90
Tabla 17. Pruebas de hipótesis sobre el costo de operación	90
Tabla 18. Factores, rangos y niveles del diseño experimental	93
Tabla 19. Niveles de los factores	94
Tabla 20. Matriz de diseño del experimento 1.....	95
Tabla 21. Análisis de la varianza para el experimento 1 en A, C y D	96
Tabla 22. Estimación de los efectos.....	98
Tabla 23. Matriz de diseño del experimento 2.....	100
Tabla 24. Análisis de la varianza para el experimento 2 en A y D.....	101
Tabla 25. Estimación de los efectos.....	103
Tabla 26. Matriz de diseño del experimento 3.....	105
Tabla 27. Análisis de varianzas para el experimento 3 en A, C Y D.....	106
Tabla 28. Estimación de los efectos.....	108

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Funciones y flujos comunes en un almacén.....	34
Ilustración 2. Distribución del tiempo de alistamiento de pedidos.....	41
Ilustración 3. Métodos de recolección de pedidos.....	43
Ilustración 4. Complejidad de los sistemas de alistamiento.....	44
Ilustración 5. Uso del espacio en el almacén	46
Ilustración 6. Posibles distribuciones para la recepción y el embarque	50
Ilustración 7. Configuración de las zonas de alistamiento y almacenamiento	55
Ilustración 8. Ancho de sección	57
Ilustración 9. Distribución de pasillos verticales	59
Ilustración 10. Aprovisionamiento interno	61
Ilustración 11. Niveles de inventarios.....	65
Ilustración 12. Distribución de pasillos horizontales	67
Ilustración 13. Distribución de pasillos con área central	71
Ilustración 14. Área de almacenamiento para 800 SKU's – modelo 1	76
Ilustración 15. Área de almacenamiento para 800 SKU's – modelo 2	79
Ilustración 16. Área de almacenamiento para 800 SKU's – modelo 3.....	82
Ilustración 17. Gráfica normal de los efectos del experimento 1	95
Ilustración 18. Gráfica de residuales-experimento 1	99
Ilustración 19. Gráfica normal de los efectos del experimento 2	101
Ilustración 20. Gráfica de residuales-experimento 2	104
Ilustración 21. Gráfica normal de los efectos del experimento 3	106
Ilustración 22. Gráfica de residuales-experimento 3	110

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A: Cantidades a almacenar en las tres distribuciones.....	122
Anexo B: Código de programación.....	158
Anexo C: Artículo científico.....	166

RESUMEN

TÍTULO: Diseño de un modelo de distribución óptimo para un área de almacenamiento de operación manual basado en la estrategia “Forward Reserve”¹

AUTOR: David Esteban Puentes Garzón²

PALABRAS CLAVE: Almacén, alistamiento de pedidos, Forward-Reserve, diseño de sistemas de almacenamiento.

DESCRIPCIÓN:

El problema de asignación *Forward Reserve* plantea la creación de un área delantera (Forward Area) y un área de reserva (Reserve Area). La primera de estas áreas almacena un número específico de ciertos productos, mientras que la segunda almacena mayores volúmenes de todos los productos, además de aprovisionar el área delantera. Esta diferenciación de áreas de almacenamiento permite una mayor utilización del espacio disponible al mismo tiempo que facilita las actividades de alistamiento de productos.

Este problema de asignación ha sido abordado por diversos investigadores y bajo diferentes enfoques; sin embargo, hay un reducido número de trabajos orientados al diseño de áreas de almacenamiento que operen con la estrategia *Forward-Reserve*. Por este motivo, el objetivo del presente trabajo es diseñar un área de almacenamiento óptima que minimice los costos de construcción, manipulación e inventario, por medio del planteamiento de un modelo matemático por cada distribución estudiada y obteniendo como resultado las dimensiones óptimas del almacén y las cantidades a almacenar en cada una de las áreas. Posteriormente, se realiza un diseño experimental y un análisis estadístico de los resultados con el fin de determinar la influencia de algunos factores en la función objetivo y establecer cuál de las tres distribuciones es la más económica.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de estudios industriales y empresariales. Director: Edwin Alberto Garavito Hernández. Ingeniero Industrial.

ABSTRACT

TITLE: Design of an optimal distribution model for a manual operation warehouse based on the strategy “Forward Reserve”³

AUTOR: David Esteban Puentes Garzón⁴

KEYWORDS: Design of a storage system, forward-reserve problem, order picking, warehouse.

DESCRIPTION:

The Forward Reserve Problem proposes the creation of a Forward area and a Reserve Area. The first of these areas, stores a specific number of certain product, while the second area stores higher quantities of all products, besides of provisioning the Forward Area. The differentiation of these areas allows a greater utilization of available spaces at the same time that facilitates order-picking activities.

This assignation problem has been treated for several investigators under different approaches; however, there is a small number of works about the design of storage areas, which operate with the strategy Forward Reserve. For this reason, the objective of this work is to design an optimal area that minimizes the costs of building, manipulation and warehousing, by means of the proposition of a mathematical model for each one of the three studied distributions, and getting as an outcome the optimal dimensions, and quantities to storage, in each area. Subsequently, it is developed an experimental design and a statistical analysis for the outcomes in order to determine the influence of some factors on the target function and to establish which of the three distributions is the cheapest (most economic).

³ Degree Project

⁴ Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de estudios industriales y empresariales. Director: Edwin Alberto Garavito Hernández. Ingeniero Industrial.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los clientes son más exigentes y no están dispuestos a adaptarse a los productos de las empresas, ni a sus criterios de trabajo, situación que ha forzado a las organizaciones a reducir sus tiempos de respuesta, mientras alcanzan grandes volúmenes de producción y distribución, haciendo uso mínimo de la función de almacenamiento a lo largo de la cadena de suministro⁵.

La planeación, operación y control de manera eficiente de los almacenes como un nodo determinado de la red de suministro, permite el alcance de estos objetivos al ser una disposición física que compensa las diferencias entre los flujos de abastecimiento y demanda, además de reducir los costos de transporte y producción.

Entre las actividades que se llevan a cabo al interior de los almacenes, la recolección de pedidos (order picking) es la que más costo representa, siendo los extensos tiempos de viaje el componente que más contribuye⁶.

Convencionalmente, la recolección de pedidos se lleva a cabo directamente en la zona de almacenamiento, lo cual puede resultar ineficiente por dos razones: La primera de ellas es la dificultad para acceder y extraer los bienes requeridos debido a la concentración de productos, mientras que la segunda está ligada a los prolongados tiempos de viaje como consecuencia de grandes superficies en los almacenes.

⁵ ROUWENHORST, Bart, et al. Warehouse design and control: Framework and literature review. En: European Journal of Operational Research. Febrero, 2000. vol 122, no 3. p 518

⁶ FOLTZ, Christopher y RAMAKRISHNAN, Sreejanth. A Novel Methodology to Allocate Commodities and Re-Layout a Warehouse. En: Industrial Engineering Research Conference (30-3, mayo-junio: Miami). Nueva York. IBM Corporation. 2009.

De acuerdo con Bartholdi y Hackman (2005) “los tiempos de viaje son un desperdicio, son actividades costosas que no agregan valor”⁷, y por consiguiente son prioritarias a la hora de buscar mejoras.

Con el fin de hacer más rápida la recolección de pedidos, en diversos casos resulta eficiente dividir el almacén en dos partes: una “Forward Area” para almacenar una cantidad específica de ciertas unidades de almacenamiento (SKUs), y una segunda que no sólo almacene grandes volúmenes, sino que también reaprovisione al área menor. Esta segunda área, de mayor tamaño, recibe el nombre de “Reserve Area”.

Hackman; Rosenblatt y Olin (1990) fueron los primeros autores en formular un modelo matemático para estimar que productos y en qué cantidad deberían almacenarse en el área de menor tamaño (Forward Area). Este modelo posee un conjunto de variables enteras que estiman los SKUs a ubicar en la *Forward Area*, y un conjunto de variables continuas que determinan el espacio a utilizar dentro de esta área. Este problema de asignación recibió el nombre de *Forward-Reserve Problem (FRP)*⁸

Contribuciones adicionales fueron propuestas por Van den Berg et al. (1998) quienes asumieron que el reaprovisionamiento se hacía de forma instantánea, por lo que solo se necesitaba almacenar un SKU en la *Forward Area*⁹. Otros autores han propuesto diversas heurísticas para resolver el *FRP*, donde la mayoría de ellas se han enfocado al nivel táctico, es decir a la elección de qué artículos almacenar, en qué cantidad y el tamaño de la *Forward Area*, asumiendo la disposición de espacio como un parámetro conocido, o en algunos casos ignorando su carácter restrictivo.

⁷ BARTHOLDI, John J.; HACKMAN, Steven T. Warehouse & distribution science: release 0.92. Atlanta, GA, The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2011. [consultado 25 de noviembre de 2015]. Disponible en: <www.warehouse-science.com>

⁸ HACKMAN, Steven; ROSENBLATT, Meir y OLIN, Jhon. Allocating items to an automated storage and retrieval system. En: IIE Transactions. Febrero, 1990. Vol. 22. no 1.

⁹ VAN DEN BERG, Jeroen P., et al. Forward-reserve allocation in a warehouse with unit-load replenishments. En: European Journal of Operational Research, 1998, vol. 111, no 1.

A menudo el diseño de almacenes suele enfocarse a temas referentes al diseño civil, pero se desconoce su función logística y operativa¹⁰, por lo que Jinxiang Gu en 2005 desarrolló un modelo integrado que equilibra las compensaciones de los elementos de costo en orden de alcanzar un diseño óptimo. Este modelo no sólo considera el *FRP* como un problema de asignación, sino que también incluye el dimensionamiento como variable y toma en cuenta la configuración de los pasillos para optimizar el costo del ciclo de vida del almacén y a su vez el order picking.¹¹

En la presente investigación se busca validar el modelo matemático planteado por Jinxiang Gu, además de estudiar dos variaciones sugeridas al diseño original. Estas variaciones serán evaluadas y comparadas bajo diferentes escenarios de operación a fin de determinar el diseño adecuado.

¹⁰ Revista de logística [en línea]. LEGIS. Enero 2016. En: < <http://revistadelogistica.com/actualidad/diez-elementos-claves-en-el-diseno-logistico-de-un-cedi/>> [citado el 27 de Abril 2016].

¹¹ GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem. Tesis de doctorado. Atlanta: Georgia Institute of Technology. 2005

CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

Tabla 1. Cumplimiento de Objetivos

OBJETIVO	CUMPLIMIENTO
Realizar una revisión de la literatura acerca del Forward Reserve Problem.	Capítulo 4
Definir los modelos matemáticos correspondientes a las disposiciones de pasillo sugeridas como variaciones a los modelos estudiados en la literatura	Capítulo 6
Resolver en GAMSIDE los modelos matemáticos definidos para cada una de las disposiciones con el fin de hallar sus dimensiones y capacidades óptimas	Capítulo 7
Plantear un diseño experimental para determinar los parámetros de diseño que tienen impacto sobre el costo del ciclo de vida del almacén	Capítulo 8
Realizar un análisis estadístico para identificar entre las distribuciones estudiadas, aquella que presente mejores resultados sobre el costo del ciclo de vida del almacén.	Capítulo 7
Elaborar un artículo de carácter publicable sobre los resultados generados en la investigación	Anexo B

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El “*Forward-Reserve Problem*” (FRP) define un área de almacenamiento delantera (Forward Area) donde se ubica una cantidad específica de ciertos productos y un área de almacenamiento de reserva (Reserve Area) que con su mayor tamaño, debe contener la totalidad de los productos y reaprovisionar a la primera.

Con el fin de reducir el alistamiento de pedidos, la primera de las áreas funciona como un almacén dentro del almacén al contener pequeñas cantidades de producto. Basado en esto, el “*Forward-Reserve Problem*” busca determinar los productos y su cantidad a almacenar en el área delantera, de tal manera que se alcance un balance entre los costos de alistamiento de pedidos y reaprovisionamiento interno del área frontal.

Con frecuencia los investigadores en este tema asumen las dimensiones del área delantera y de reserva como conocidas, basando en estas suposiciones el desarrollo de sus modelos, lo que podría limitar sus resultados. Por este motivo en el presente trabajo se busca determinar las dimensiones del área de almacenamiento, la orden de pedido, la cantidad de productos a almacenar en el área delantera y la distribución de los pasillos con el fin de proveer un diseño óptimo que permita atender los objetivos del *Forward-Reserve Problem*. El problema principal que se aborda es el dimensionamiento del área delantera y de reserva y como sub-problema la distribución de los pasillos. Así, el objetivo que se quiere alcanzar es minimizar el costo del ciclo de vida del almacén al reducir de manera conjunta los costos de construcción, de inventarios y manipulación de materiales.

2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, los avances tecnológicos, el comercio internacional y la globalización, agilizan y flexibilizan la cadena de suministro, pero a su vez generan mayor vulnerabilidad a las interrupciones a lo largo de la misma con el distanciamiento físico de sus actividades: proveedores, producción, distribución-almacenamiento y clientes.¹²

De todos los elementos, el almacenamiento ha acaparado la atención gracias a las demandas crecientes y nuevas exigencias de los clientes hacia las organizaciones.

Generalmente los Almacenes ejecutan labores de recepción, almacenamiento, recolección y embarque; la tercera de estas actividades es la más costosa y representa cerca de un 55% de los costos totales de operación¹³. Esto se atribuye a los extensos tiempos de viaje en el Alistamiento de pedidos (*Order Picking*), factor principal en el proceso.

Una estrategia ampliamente utilizada para minimizar los tiempos de viaje en la Recolección de pedidos es la creación de dos áreas de almacenamiento: una delantera y otra trasera. El problema que surge para la asignación de productos y determinación de reaprovisionamiento para cada una de estas áreas es conocido como *Forward-Reserve Problem*. Se plantea que en el área delantera se debe almacenar una cantidad apropiada de productos específicos en un momento determinado, mientras en la segunda no sólo se almacenarán grandes volúmenes, sino que también, esta será la encargada de aprovisionar el área delantera. Esto permitirá alcanzar una reducción de los tiempos de viaje sin descuidar la

¹² FRAZELLE, Edward. The Definition, Evolution and Role of Logistics in Business. En: Supply Chain Strategy. United States: McGrwanHill, 2001. p. 13.

¹³ KOSTER, René de; LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Design and control of warehouse order picking: A literature review. En: European Journal of Operational Research. Octubre, 2006. no 182. p 492.

utilización del espacio, de tal manera que la recolección de productos sea lo más rápida posible.

El *Forward-Reserve Problem* fue inicialmente estudiado por Hackman; Rosenblatt y Olin (1990) al formular un modelo matemático para la asignación de espacio, pero debido a su complejidad e importancia se han desarrollado múltiples variaciones. Algunas de ellas incluyen el modelo de Frazelle, Hackman y Platzman (1994) quienes incluyen el tamaño del Forward Area como variable de decisión, un Modelo de Reaprovisionamiento con Unidades de Carga de Van den Berg et al (1997), el Forward Reserve Problem con demandas estacionales de Nguyen (2005) y un Modelo Discreto por Walter et al (2013).

Otros autores han propuesto resolver el problema con diversas heurísticas, la mayoría orientadas a estimar la cantidad óptima a almacenar de un determinado producto. Sin embargo, han sido pocos los autores que han orientado sus esfuerzos hacia el diseño físico de los almacenes para que operen bajo la estrategia FR. Dado el carácter transcendental de esta decisión y el impacto que tiene en los costos de operación, es de interés plantear, analizar y evaluar diferentes propuestas para el diseño de un área de almacenamiento, haciendo uso de la distribución Forward Reserve.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

3.1 OBJETIVO GENERAL

Presentar un modelo de distribución basado en la estrategia Forward Reserve para minimizar el costo del ciclo de vida en almacenes de operación manual.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión de la literatura acerca del Forward Reserve Problem.
- Definir los modelos matemáticos correspondientes a las disposiciones de pasillos sugeridas como variaciones a los modelos estudiados en la literatura.
- Resolver en GAMSIDE los modelos matemáticos definidos para cada una de las disposiciones con el fin de hallar sus dimensiones y capacidades óptimas.
- Plantear un diseño experimental para determinar los parámetros de diseño que tienen impacto sobre el costo del ciclo de vida del almacén
- Realizar un análisis estadístico para identificar entre las distribuciones estudiadas, aquella que presente mejores resultados sobre el costo del ciclo de vida del almacén.
- Elaborar un artículo de carácter publicable

3.3 ALCANCE

En la presente investigación se estudiará un modelo de distribución planteado en la literatura, en base a este trabajo se sugieren dos variaciones al modelo original, lo que es igual al planteamiento de dos modelos matemáticos alternos. Posteriormente, se analizan y comparan las distribuciones haciendo uso de herramientas estadísticas.

4. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La recolección de pedidos u order picking es una de las actividades más intensas al interior de los almacenes de operación manual, y con el mayor capital operativo en los sistemas automatizados¹⁴. Su tiempo de ejecución está dado por actividades como la búsqueda y captura de pedidos y el viaje entre puntos de almacenamiento. Este último es quizás el factor que más contribuye a los amplios tiempos de recolección, por lo que las empresas e investigadores en un intento por disminuir los tiempos de viaje han optados por estrategias como: Asignar lugares de almacenamiento, asignar operarios para realizar sus labores en una zona específica del almacén, agrupar ordenes de pedido y procesarlas como una sola, establecer rutas de viaje y diseñar el área de almacenamiento.¹⁵

Para la elaboración de la presente investigación se consideró la asignación de lugares y el diseño del área de almacenamiento como estrategias para optimizar la utilización de espacio y el order picking.

4.1 ASIGNACIÓN DE LUGARES: FORWARD-RESERVE PROBLEM

Los productos necesitan ser dispuestos en lugares determinados antes de ser procesados para cumplir con las órdenes de los clientes, por lo que el método de asignación establece un conjunto de reglas a usar para dictaminar los sitios de almacenamiento¹⁶. Una posibilidad para establecer estos lugares consiste en dividir el almacén en dos áreas: Un área de reserva (Reserve Area) y un área delantera (Forward Area), donde esta última se encargará de almacenar una cantidad específica de ciertos productos en un espacio limitado de tal manera que reduzca las distancias de viaje. Mientras que el área de reserva concentrará

¹⁴ THOMAS, Lisa y MELLER, Russell. Developing guidelines for a case-picking warehouse. En: International Journal of Production Economics. Diciembre 2015. vol 170, parte C.

¹⁵ KOSTER, René de; LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Op. Cit. p 485

¹⁶ *Íbid*, p 484

grandes volúmenes de mercancía por unidad de área, aumentando así la utilización del espacio mientras cumple la función de reaprovisionar al área delantera.

Hackman, Rosenblatt y Olin¹⁷. en **1990** fueron los primeros autores en presentar un modelo matemático que permitiera estimar los SKUs (unidades de almacenamiento) a almacenar en la *Forward Area*, y su respectiva cantidad. Este modelo es similar al clásico problema de la mochila (Knapsack) con la excepción de que la función objetivo no es lineal y presenta una discontinuidad en cero, por lo Hackman, Rosenblatt y Olin proponen un algoritmo codicioso para resolver el problema de asignación Forward-Reserve.

Frazelle et al.¹⁸ en **1994** consideraron la estimación de los SKUs a almacenar y su cantidad como un sub problema para el cálculo del tamaño de la *Forward Area*, la que para ellos es una decisión crítica de diseño. Este trabajo demuestra que los productos almacenados pueden ser ordenados a priori de acuerdo a una razón que depende exclusivamente de las características de los productos y no de los parámetros del almacén. Esta razón llamada “economic assignment quotient” permite transformar el sub problema de asignación y ubicación en un simple problema de clasificación. Adicionalmente demuestran que asumir la congestión en los pasillos como una restricción resulta redundante para el problema.

Van den Berg et al.¹⁹ en **1998** asumen que los almacenes tienen un periodo de ocupación en el que se ejecutan las actividades de recolección de pedidos, y un periodo de receso en el cual se cuenta con suficiente tiempo para realizar el reaprovisionamiento de la *Forward Area*. Los autores suponen que en la *Forward Area* se almacenan unidades de productos y que el reaprovisionamiento se da en unidades de carga (Pallets, cajas, etc.), lo cual permite monitorear frecuentemente

¹⁷ HACKMAN, Steven; ROSENBLATT, Meir y OLIN, Jhon. Op. Cit.

¹⁸ FRAZELLE, Edward et al. The Forward Reserve Problem. En: Optimization in industry 2. Nueva York, John Wiley y Sons, Inc, 1994.

¹⁹ VAN DEN BERG. Op. Cit.

las existencias y realizar el reaprovisionamiento al instante, antes de que el producto se agote. Este trabajo presenta un modelo general donde el tiempo total de labor es minimizando, y un modelo restrictivo que limita el número de reaprovisionamientos durante el periodo de ocupación.

Como requerimiento para optar por el grado de doctor, **Jinxiang Gu** en **2005** expuso un modelo que integraba el problema de asignación Forward Reserve y el problema de capacidad y dimensionamiento de almacenes. Las decisiones consideradas en este modelo incluyen: (i) Capacidad y dimensiones del almacén; (ii) Localización del espacio entre la *Forward Area* y la *Reserve Area*; (iii) Los SKUs a almacenar en la *Forward Area* y su respectiva cantidad; y (iv) Los lugares a ocupar por cada SKU en la *Forward Area*. Se plantea como objetivo optimizar el costo total de equipos, inventarios y manipulación de materiales para el order picking y el reaprovisionamiento, por lo que se propone un algoritmo heurístico jerárquico de dos niveles para resolver el problema general, donde los SKUs a almacenar, la capacidad y las dimensiones del almacén son variables de decisión²⁰.

Bartholdi y Hackman²¹ en **2008** presentan lo que se podría considerar la continuación del trabajo de Hackman; Rosenblatt y Olin²², al asumir que los SKUs a almacenar en la *Forward Area* ya han sido elegidos, además de considerar que el reaprovisionamiento se da de forma fluida. En el estudio, los autores analizan y comparan las estrategias de localización Equal Space (EQT), Equal Time (EQT) y la estrategia óptima de almacenamiento de partes pequeñas. Se demuestra que utilizar la misma cantidad de espacio para almacenar cada SKU es equivalente a almacenar los SKUs según su tiempo de suministro. También se manifiesta que es posible alcanzar un 6% de reducción en el reaprovisionamiento de la *Forward*

²⁰ GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem Op. Cit.

²¹ BARTHOLDI, John y HACKMAN, Steven. Allocating space in a forward pick area of a distribution center for small parts. En: IIE Transactions. Febrero, 2008. vol 40. no 11.

²² HACKMAN, Steven; ROSENBLATT, Meir y OLIN, Jhon. Op. Cit.

Area al cambiar de una estrategia “*Equal Space/Time*” a una estrategia optima de almacenamiento.

En 2011, estos mismos autores reconocieron y expusieron algunos inconvenientes del modelo de fluidos de Hackman; Rosenblatt y Olin²³. Estos hallazgos permitieron que en **2013 Walter, Boysen y Scholl**²⁴ propusieran un modelo discreto como alternativa. Específicamente, ellos estudiaron el problema discreto de localización Forward-Reserve (DFRAP), el problema discreto de localización y asignación Forward-Reserve (DFRAAP) y el problema discreto de localización y dimensionamiento Forward-Reserve (DFRASP), al mismo tiempo que consideraron dos conjuntos diferentes de restricciones, estudiando finalmente un total de seis problemas. Se concluye que el modelo de fluidos puede presentar una desviación respecto al tamaño óptimo, sin embargo, el impacto de esta brecha es relativamente pequeño si el proceso de asignación de SKUs es minucioso.

Otros autores han explorado consideraciones adicionales para el Forward-Reserve Problem como es el caso de Nguyen, Usher y DePuy²⁵ con su modelo con demandas estacionales y HUN²⁶ con algoritmos para la localización dinámica de la Forward Area.

4.2 DISEÑO DE ALMACENES

El diseño de almacenes frecuentemente se deriva de la expansión de las empresas, saturación de las instalaciones o un incremento en las ventas; pero

²³ HACKMAN, Steven; ROSENBLATT, Meir y OLIN, Jhon. Op. Cit.

²⁴ WALTER, Rico; BOYSE, Nils y SCHOLL, Amin. The discreet forward-reserve problem – Allocation space, selecting products, and area sizing in forward order picking. En: European Journal of Operational Research. Marzo, 2013. vol 229. no 3.

²⁵ NGUYEN, Tim; USHER, John y DEPUY, Gail. The Forward-Reserved problem with Seasonal Demand. En: IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial Engineers. 2005.

²⁶ HUN, Şilan. Algorithms for dynamic forward área allocation in a warehouse. Tesis de maestría. Estambul, Turquía. 2005.

ocasionalmente es tomada como parte del diseño estructurado de la cadena de suministro²⁷.

El diseño de almacenes está constituido por cinco decisiones notables: Estructura general del almacén (Diseño Conceptual), capacidad y dimensión del almacén y sus departamentos, determinación de la distribución de cada departamento, selección del equipo de almacenamiento y selección de las estrategias de operación²⁸. Estas decisiones suelen ser estudiadas individualmente o en conjunto para satisfacer el principal objetivo del diseño de almacenes: Disminuir el valor presente del costo de instalación y operación del almacén en un periodo de tiempo determinado, sujeto a unas restricciones de recursos y desempeños²⁹. A continuación se presenta una breve revisión de la literatura para algunas de las decisiones mencionadas anteriormente.

- Estructura general del almacén (Diseño Conceptual)

En **1989 Park y Webster**³⁰ presentaron una investigación en la que desarrollaban un procedimiento óptimo para el diseño de almacenes que incluía la selección tridimensional y los sistemas de almacenamiento por pallets. Todas las alternativas son comparadas mientras simultáneamente se consideran factores como: alternativas de equipos de manipulación, políticas de inventario y procedimientos de control.

En **1994 Sharp**³¹ publicó un trabajo en el propone usar la simulación como herramienta para comparar y evaluar alternativas de diseño de espacio y “order

²⁷ Revista de logística. Op. Cit.

²⁸ GU, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marc y MCGINNIS, Leon. Research on warehouse design and performance evaluation: a comprehensive review. En: European Journal Operational Research. Agosto. 2010. vol 203, no 3.

²⁹ GOETSCHALCKX, Marc. Warehousing Systems Design. [Diapositivas]. Atlanta, Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology. 2000. 18 diapositivas.

³⁰ PARK, Young, y WEBSTER, Dennis B. Modelling of three-dimensional warehouse systems. En: The international journal of production research, 1989, vol. 27, no 6.

³¹ SHARP, Gunter Pielbusch; VLATSA, Dimitra y HOUMAS, Constantin George. Economics of storage/retrieval systems for item picking. En: Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, 1994.

picking”, las cuales incluyen etapas como la recolección de información, desarrollo de alternativas de diseño y evaluación del funcionamiento.

Las investigaciones relacionadas con la estructura general del almacén son bastantes limitadas. Además de esto, los dos trabajos analizados coinciden en la metodología de estudio, pues en ellos se divide el problema del diseño conceptual en sub-problemas, los cuales interactúan entre ellos y son secuenciales.

- Capacidad y dimensiones del almacén y sus departamentos

Uno de los primeros trabajos encaminados a estimar la capacidad del almacén fue presentado en **1971** por **White y Francis**³². El problema que ellos examinan es la determinación de la capacidad óptima de los almacenes, donde el almacenamiento se da en un periodo de tiempo limitado. La función de costo planteada incluye los costos de construcción, el almacenamiento de los productos y el costo de faltantes. En este trabajo se consideran los problemas de capacidad fija y variable bajo condiciones de demandas de almacenamiento determinísticas y probabilísticas, por lo que los autores proponen un modelo de programación lineal para esta última consideración y una solución óptima basada en el problema de flujo de redes.

En **1984 Hung y Fisk**³³ formulan un modelo de programación lineal que permite determinar la capacidad óptima del almacén cuando la demanda es altamente estacional. El modelo es extendido al problema de capacidad dinámica en la que el tamaño del almacén puede variar con el tiempo.

³² WHITE, John y FRANCIS, Richard: Normative models for some warehouse sizing problems. En: AIIE Transactions, 1971, vol. 3, no 3.

³³ HUNG, M. S, y FISK, John. Economic sizing of warehouses: A linear programming approach. En: Computers & Operations Research, 1984, vol. 11, no 1.

Rao y Rao³⁴ en **1998** presentan un modelo alternativo para la determinación de la capacidad del almacén en condiciones estáticas. Se presentan tres variaciones del problemas, las cuales incluye costos variables en el tiempo, gastos de capital por economías de escala y costos de operación. Además, se expone que el problema de capacidad dinámica puede ser modelado como un problema de redes y de igual forma puede ser solucionado con algoritmos de redes.

Huang et al³⁵. Exponen un modelo integrado que determina la localización de los almacenes y su capacidad. El objetivo planteado es minimizar los costos de transporte de entrada y salida y el costo total de operación, que incluye los costos fijos asociados a la localización y los costos variables relacionados a los requerimientos de espacios para determinados niveles de servicio. Los autores plantean un modelo continuo y un modelo discreto, los cuales son evaluados computacionalmente. Los resultados encontrados indican que para las condiciones establecidas en este trabajo es apropiado usar el modelo continuo para problemas de tamaño pequeño y mediano, y para el caso de problemas más rigurosos es recomendable el modelo discreto.

- Determinación de la distribución de cada departamento

La determinación de la distribución del almacén es un factor importante que afecta directamente los sistemas de alistamiento de pedidos, por lo que su planeación está dada principalmente por tres problemas: Secuenciación de los bloques de apilamiento, distribución del área de almacenamiento y configuración de los sistemas automatizados. Para el caso de esta investigación, sólo se realiza la revisión de la distribución del área de almacenamiento.

³⁴ RAO, M.R Y RAO, A.K. Solutions procedures for sizing of warehouses. En: European Journal of Operational Research. Abril, 1998. vol 108.

³⁵ HUANG, Simin et al. An integrated model for site selection and space determination of warehouses. En: Computer and Operations Research. Noviembre, 2014. vol 62.

La determinación de la configuración del área de almacenamiento incluye decisiones como la ubicación de los puntos de acceso y el número y orientación de los pasillos, al igual que su ancho y profundidad. Este problema tiene repercusiones respecto al costo de construcción y operación, capacidad del almacén, utilización del espacio y del equipo, por lo que su objetivo se centra en la optimización de estos elementos

Bassan, Roll y Rosenblatt³⁶ comparan dos configuraciones de pasillos (Paralela y transversal) en un área de almacenamiento homogénea. Los autores consideran los costos de manipulación y los costos asociados al área de almacenamiento y su perímetro, por lo que desarrollan expresiones óptimas para establecer los parámetros de diseño. Adicionalmente, ellos discuten la localización óptima de los puntos de acceso y la configuración de los pasillos cuando el área de almacenamiento es dividida en zonas.

Pandit y Palekar³⁷ evalúan el impacto del diseño de almacenes en los tiempos de respuesta en la manipulación de materiales, por lo que presentan un modelo teórico de colas con un sistema de múltiples vehículos para calcular el tiempo total de respuesta. En este trabajo se demuestra que el tiempo de respuesta decrece con la redistribución de la zona de almacenamiento, motivo que lleva a desarrollar un procedimiento óptimo e iterativo para realizar dicha redistribución y localizar los puntos de acceso.

Hsieh y Tsai³⁸ en **2004** consideraron factores como las políticas de almacenamiento y alistamiento, el número y distribución de los pasillos y la combinación de pedidos para determinar su influencia en los sistemas de

³⁶ BASSAN, Yoseph; ROLL, Yaakov y ROSENBLATT, Meir. Internal layout design of a warehouse. En: AIIE Transactions, 1980, vol. 12.

³⁷ PANDIT, R y PALEKAR, U. S. Response time considerations for optimal warehouse layout design. En: Journal of engineering for industry, 1993, vol. 115, no 3.

³⁸ HSIEH, Ling-feng; TSAI, Lihui. The optimum design of a warehouse system on order picking efficiency. En: The International journal of advanced manufacturing technology, 2004, vol. 28, no 5-6.

alistamiento de pedidos. Para lograr esto, se hace uso del software eM-plant como herramienta de simulación y análisis, obteniendo como resultado un índice de evaluación basado en la distancia promedio para el alistamiento de pedidos. Este índice, al igual que una base de datos es proporcionado a la industria como referencia para la planeación y diseño de almacenes.

Roodbergen y Vis³⁹ describen un enfoque para determinar la distribución de un área de alistamiento de pedidos, donde se plantea como objetivo minimizar la distancia promedio de viaje. Para ello se determina un modelo de programación no lineal, donde se hace uso de expresiones para estimar las distancias promedios de viaje. Estas expresiones son desarrolladas por los autores para dos políticas de ruteo diferentes (Rutas en S y Mayor Espacio). Como resultado se encuentra que el número óptimo de pasillos en un área de alistamiento de pedidos depende en gran medida del espacio disponible y el tamaño de los pedidos.

Cakmak et al⁴⁰. Presentan una distribución tipo U que no había sido considerada anteriormente. Para la determinación de esta distribución, se consideran diferentes disposiciones de pasillos y puntos de acceso, las cuales son evaluadas individualmente para luego ser comparadas, obteniendo finalmente un diseño que permite minimizar la distancia total de viaje.

- Elección de estrategias de operación

La elección de las estrategias de operación es una decisión que es tomada con cautela, debido a que se define la forma en que los operarios de un almacén deben realizar sus labores, por lo que es poco probable cambiar de decisión con

³⁹ ROODBERGEN, Kees Jan y VIS, Iris FA. A model for warehouse layout. En: IIE transactions, 2006, vol. 38, no 10.

⁴⁰ ÇAKMAK, Emre, et al. Determining the size and design of flow type and u-type warehouses. En: Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, vol. 58.

frecuencia. Las dos estrategias que más sobresalen en los almacenes son: Estrategias de almacenamiento y Estrategias de Recolección de Pedidos.

Malmborg⁴¹ desarrolla un modelo analítico que permite compara las políticas de almacenamiento dedicado y aleatorio en almacenes para cantidades inferiores a una unidad de carga. Los autores argumentan que debido a las limitaciones computacionales no es posible emitir un juicio final, sin embargo, aseguran que el modelo proporciona una herramienta práctica para el análisis de este tipo de almacenes.

Las estrategias de recolección de pedidos definen la manera en que los operarios transitan el área de alistamiento para tomar los pedidos solicitados. **Lin y Lu**⁴² en **1999** plantearon un procedimiento computacional para determinar qué estrategia de alistamiento utilizar. Este mecanismo propuesto consiste en dos fases: En la primera, se clasifican los pedidos según la cantidad y el número de ítems por pedido; Mientras que en la segunda fase, mediante simulación, se define para cada clasificación la estrategia óptima de alistamiento. Adicionalmente, se incluye un análisis de varianza para analizar los efectos de las diferentes estrategias.

Petersen⁴³ fue uno de los primeros autores en evaluar múltiples estrategias de alistamiento bajo diferentes escenarios de operación. En su trabajo evalúa las estrategias de alistamiento por lotes, zonas, olas, brigadas de pedido y pedido a pedido usando los requerimientos de trabajo, tiempo de procesamiento y servicio al cliente como medidas de desempeño. Esta evaluación realizada mediante simulación permitió determinar que las estrategias de alistamiento por olas y por lotes son claramente superiores, y su desempeño no se ve afectado por la asimetría de la demanda o el volumen de pedidos diarios. Sin embargo, las

⁴¹ MALMBORG, C. J. Analysis of storage assignment policies in less than unit load warehousing systems. En: International Journal of Production Research. 1998, vol. 36, no 12.

⁴² LIN, Che-Hung y LU, Iuan-Yuan. The procedure of determining the order picking strategies in distribution center. En: International Journal of Productions economics. 1999. Vol 60.

⁴³ PETERSEN, Charles G. An evaluation of order picking policies for mail order companies. En: Production and Operations Management. Invierno, 2000. Vol 9, no 4.

estrategias de alistamiento por zonas resultan no ser adecuadas, especialmente si se procesan altos volúmenes de pedido.

Parikh y Meller⁴⁴ determinan el costo de las estrategias de alistamiento por lotes y por zonas a partir de un modelo de costo desarrollado por ellos mismos. Este modelo incluye elementos tales como el costo por operario, equipo, desbalances, clasificación y empaçado. De acuerdo a los resultados de sus estudios experimentales, se encuentra que la relación entre la carga de trabajo y los desbalances es mayor en el alistamiento por zonas en comparación de con el alistamiento por lotes. Por otro lado, esta relación es más prominente cuando el tamaño del pedido y el número de olas aumenta y el tiempo de entre pedidos no es uniforme

⁴⁴ PARIKH, Pratik J y MELLER, Russell D. Selecting between batch and zone order picking strategies in a distribution center. En: Transportation Research Part E. Marzo, 2007. Vol 44, no 5.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 OPERACIONES EN LOS ALMACENES

5.1.1 Definición de almacén. Los almacenes o bodegas pueden ser entendidos como disposiciones físicas destinadas a ubicar, mantener y manipular artículos en condiciones adecuadas para su utilización desde el momento en que son producidos, hasta el instante en que son requeridos.

Estas disposiciones son un componente esencial en la red de suministro, ya que permiten una rápida reacción a las variaciones de la demanda, además de reducir los costos de transporte y producción, apoyar el proceso de comercialización y consolidar productos.

De acuerdo con A.T Kearny⁴⁵, el almacenamiento corresponde a un 2.9% del costo total del producto, por lo que frecuentemente, esta función es vista como una actividad que no agrega valor y sí genera gastos. No obstante, para los clientes un producto es considerado como valioso si este es útil y está disponible, lo que es posible gracias a los almacenes. Cuando se menciona la utilidad del producto, se hace referencia a su diseño, mecanismo y estructura, mientras que la disponibilidad corresponde a poder contar con el producto donde se requiera en el momento que se necesite⁴⁶. Es por esto que el almacenamiento puede ser considerado como un mal necesario o una oportunidad real de las organizaciones para asegurar un nivel de servicio en sus estrategias logísticas⁴⁷.

⁴⁵ A.T. Kearny's Logistics Excellence in China Study [en línea]. Chicago, Illinois. A.T. Kearny.2010 [Citado 2016-05-5]. Disponible en:< <https://www.atkearney.com/documents/10192/dbbb7c71-fdc1-4f26-a9f5-0ebf9712e39b>>

⁴⁶ JENKINS, Creed H. Modern Warehouse Management. S.I.: McGraw-Hill, 1968.

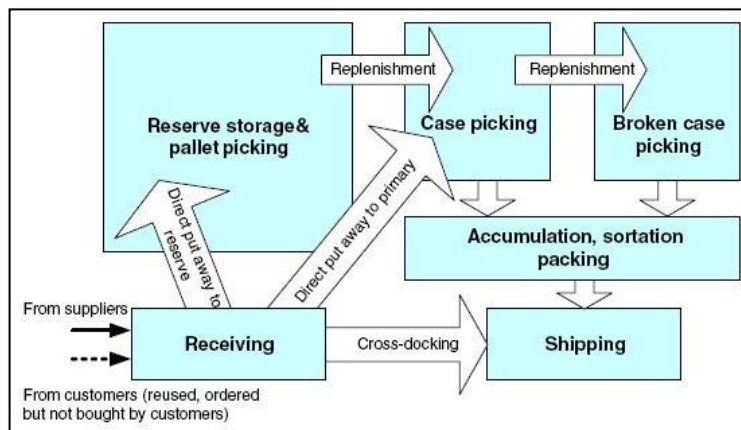
⁴⁷ MORA GARCÍA, Luis Aníbal. Gestión logística en centros de distribución, bodegas y almacenes. Bogotá D.C: Ecoe Ediciones, 2011. ISBN: 978-958-648-722-1.

5.1.2 Objetivos del almacenamiento. De forma general se establece que los objetivos del almacenamiento son:

- Utilizar al máximo el espacio, los equipos y la mano de obra disponible
- Facilitar el acceso a los artículos
- Garantizar la protección de los artículos

5.1.3 Funciones del almacén. Considerando la definición trivial de los almacenes como lugares para guardar insumos y/o productos, sus funciones pueden ser clasificadas en: recepción, almacenamiento, alistamiento de pedidos y embarque. La ejecución de estas actividades precisa de recursos como espacio, equipos y mano de obra, y a su vez, cada actividad debe ser realizada de manera coordinada para satisfacer los requerimientos de capacidad, flujo y nivel de servicio a un costo mínimo⁴⁸. En la ilustración 1 se presentan las funciones del almacén gráficamente para facilitar su visualización.

Ilustración 1. Funciones y flujos comunes en un almacén



Fuente: KOSTER, René de; LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Design and control of warehouse order picking: A literature review. p 485

⁴⁸ GU, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marc y MCGINNIS, Leon. Research on warehouse operation: a comprehensive review. En: European Journal Operational Research. Febrero, 2006. vol 177, no 3.

Las funciones del almacén a grandes rasgos son definidas como:

A. Recepción

La recepción de mercancías desempeña un papel importante en las operaciones logísticas al ser la primera actividad llevada a cabo en los almacenes. Su importancia recae en la posibilidad de generar costos adicionales si se cometen errores en la aceptación e identificación de los productos recibidos, puesto que cualquier falla sólo será detectada hasta que el producto sea requerido, o en el peor de los casos, cuando se esté embarcando la orden de un cliente⁴⁹.

En esta operación se verifica la cantidad y calidad de los bienes recibidos, se inicia el control de inventarios y se clasifican según las políticas establecidas por cada almacén. Subsecuentemente, estos bienes son organizados en unidades de carga (Pallets, contenedores, cajas) para finalmente ser ubicados en la zona de almacenamiento en el caso de los almacenes tradicionales, o en la zona de tránsito para los almacenes tipo cross-docking⁵⁰.

Los objetivos de la recepción son⁵¹:

- Garantizar que los artículos recibidos cumplan con las descripciones de calidad, cantidad, tiempo de entrega y documentación establecidas por la compañía.
- Identificar de manera oportuna cualquier no conformidad que pueda entorpecer la calidad de los procesos productivos y de distribución.
- Garantizar la fluidez en la ejecución de las demás funciones del almacén.

⁴⁹ JENKINS, Creed H. Op. Cit

⁵⁰ VAN DEN BERG, Jeroen P y ZIJM, W. Models for warehouse management: Classification and examples. En: International Journal of Production Economies. 1999. vol 59.

⁵¹ MORA GARCÍA, Luis Aníbal. Op. Cit.

B. Almacenamiento

El almacenamiento es aquella operación básica de los almacenes que busca guardar y conservar los productos al menor costo y riesgo posible, para lo cual se debe responder tres preguntas fundamentales:

- ¿Qué cantidad se debe almacenar de cada artículo?
- ¿Con que frecuencia y en qué momento se debe reaprovisionar?
- ¿Dónde se debe ubicar cada artículo?

Las dos primeras preguntas están relacionadas con el problema de tamaño y escalonamiento del almacén respectivamente, mientras que la tercera de ellas está vinculada con la asignación de almacenamiento⁵², uno de los principales ejes de la presente investigación, por lo que se hace especial énfasis en esta.

La asignación de almacenamiento abarca decisiones como la adjudicación de áreas y zonas de almacenamiento, además de establecer las políticas para determinar el lugar que debe ocupar cada producto. Estas decisiones están encaminadas a satisfacer dos objetivos de los almacenes: Hacer uso total del espacio (eficiencia) y facilitar el acceso a los productos.

- **Áreas de almacenamiento**

Como ya ha sido mencionado, dos de los principales objetivos de los almacenes son facilitar el acceso a los productos y aprovechar a totalidad su espacio. Pero lamentablemente existe una contradicción entre estos objetivos, mientras que la utilización de espacio incluye una alta densidad de productos almacenados, el alistamiento de pedidos requiere de una densidad baja para facilitar el acceso a

⁵² GU, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marc y McGINNIS, Leon. Research on warehouse operation: a comprehensive review. Op. Cit.

los productos, razón suficiente para que un gran número de almacenes haya optado por la creación de áreas de almacenamiento⁵³.

Estas áreas o departamentos son ubicaciones específicas donde se almacena una cantidad determinada de ciertos productos⁵⁴. Por ejemplo, una empresa puede establecer un departamento de almacenamiento exclusivamente para un producto o para un cliente en particular. Esta especificación de áreas corresponde a una decisión de diseño de nivel táctico, por lo que cualquier decisión tendrá repercusiones en las operaciones del almacén⁵⁵.

El Forward-Reserve Problem es uno de los casos más populares de asignación de áreas de almacenamiento. Esta práctica sugiere la creación de un área compacta (Forward Area), donde se ha de almacenar un selecto grupo de productos en una cantidad específica, mientras que en una segunda área (Reserve Area) no sólo se almacenan grandes cantidades de todos los productos, sino que también funciona como proveedor de la Forward Area.

A pesar de que esta estrategia permite reducir los costos de alistamiento de pedidos, requiere de un manejo adicional de materiales, lo que se convierte un costo extra por el reaprovisionamiento de la Forward Area. Por este motivo, la elección de los productos a almacenar y sus cantidades debe ser tomada con cautela, ya que si el número de productos almacenados es mínimo, el número de reaprovisionamientos será mayor, y si por el contrario se decide almacenar grandes volúmenes, los beneficios en el ahorro de costos del alistamiento de pedido se verán reducidos⁵⁶.

⁵³ ĐURĐEVIĆ, Dragan B y MILJUŠ, Momčilo D. THE PROCEDURE PROPOSAL FOR ORDER PICK AREA DESIGN. En: Tehnicki vjesnik/Technical Gazette. Febrero, 2013, vol. 20.

⁵⁴ TOMPKINS, James et al. Planeación de instalaciones. Traducido por: Patricia Solorio. 4 ed. Granjas México, Cengage Learning Editores, 2011. p. 394.

⁵⁵ ROUWENHORST, Bart, et al. Warehouse design and control: Framework and literature review. Op. Cit.

⁵⁶ Gu, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marca y McGINNIS, Leon. Reserach on warehouse operation: A comprehensive review. Op. Cit

- Zonas de almacenamiento (Zoning)

Esta segunda estrategia de asignación establece la creación de zonas de acopio al interior de los almacenes. La principal motivación para hacer esta división por zonas, es la de organizar y facilitar las actividades de alistamiento de pedidos, teniendo como principal ventaja la reducción de las distancias de viajes, la descongestión de los pasillos e incluso la familiarización del operario con la ubicación de cada producto. Por otro lado, tiene como desventaja la segmentación de las órdenes, las cuales deben ser consolidadas nuevamente antes de hacer el embarque del pedido, lo que representa un costo adicional por reproceso⁵⁷.

- Políticas de almacenamiento

Son directrices que establecen las pautas y requisitos de la asignación de productos a lugares de almacenamiento para garantizar el cumplimiento de los objetivos del almacén. Cada organización puede elegir a criterio propio sus políticas, siendo las más populares: el almacenamiento aleatorio, dedicado y dedicado basado en clases (ABC)

- Almacenamiento aleatorio

Como su nombre lo indica, en esta política los lugares de almacenamiento son asignados aleatoriamente dependiendo de la disponibilidad de espacio, por lo que cada ubicación tiene la misma probabilidad de ser ocupada. Este método presenta algunas desventajas como lo es la alta inversión en sistemas de información para identificar de manera oportuna la ubicación de cada producto. No obstante, es la que menos espacio requiere en comparación con las otras dos políticas tratadas⁵⁸.

- Almacenamiento dedicado

Otra posibilidad es almacenar cada producto en un lugar específico, ocupando de esta forma un lugar fijo dentro del sistema de almacenamiento. Esta segunda

⁵⁷ KOSTER, RENÉ de; Le-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Ja. Op.Cit.

⁵⁸ UNIVERSIDADE FEDERAL DE RIO GRANDE DO SUL, Projeto de Armazéns. [Diapositivas]. Porto Alegre.

política recibe el nombre de almacenamiento dedicado, y contrario a la política anterior, requiere de una mayor utilización de espacio, lo que conlleva a largas distancias de viaje para el alistamiento de pedidos. Sin embargo, el contar con un lugar establecido permite a los operarios familiarizarse con la distribución de los productos, lo que consiente el ahorro en operaciones de búsqueda.

- Almacenamiento dedicado basado en clases (ABC)

Esta política plantea el uso del principio de Pareto como herramienta para clasificar los productos en clases según su popularidad. Esta premisa indica que cerca del 20% de los productos almacenados contribuyen al 80% de la rotación de existencias, por lo que este selecto grupo de productos recibe una clasificación tipo A, mientras que a las mercancías restantes se les asignan calificaciones de B o C, dependiendo de su contribución⁵⁹.

El almacenamiento dedicado por clases puede ser definido como una combinación de las dos estrategias anteriormente explicadas, ya que cada producto es situado de manera aleatoria dentro del área especificada para cada clase.

C. Alistamiento de pedidos (order picking)

La eficiencia en los almacenes depende en gran medida de la correcta planeación, ejecución y control de las actividades de alistamiento de pedidos y almacenamiento.

Convencionalmente el almacenamiento de productos se da en unidades de carga como pallets, contenedores y cajas para facilitar su manipulación, pero los pedidos del cliente suelen ser cantidades reducidas. A este tipo de sistemas donde la cantidad de cada pedido es inferior a una carga unitaria se les conoce como sistemas de alistamiento de pedidos (Order Picking)⁶⁰.

⁵⁹ ROUWENHORST, Bart, et al. Op. Cit.

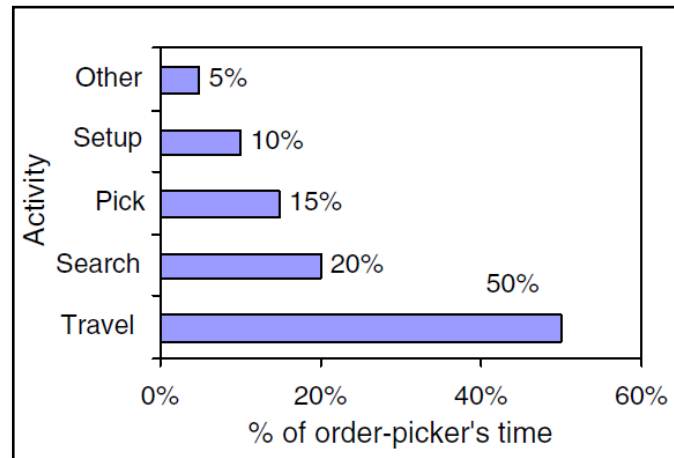
⁶⁰ TOMPKINS, James et al. Op. Cit. p 627.

El alistamiento de pedidos requiere ejecutar de manera óptima las tareas de agrupar y programar las órdenes de los clientes, buscar y tomar los productos requeridos, consolidar los productos si es el caso y transferirlos a la zona de expedición, para poder maximizar el nivel de servicio sujeto a restricciones de equipo, mano de obra y capital.

Adicional a este objetivo, los investigadores y las empresas concuerdan en mejorar la productividad del alistamiento de pedidos, por lo que han optado por el diseño de áreas almacenamiento, formación y recolección por lotes y zonas, asignación de almacenamiento y el diseño de recorridos (rutas) como estrategias y políticas para reducir los extensos tiempos de viajes, los que son considerados como el principal responsable de los altos costos del alistamiento de pedidos, que pueden llegar a representar hasta el 55% de los costos de operación del almacén⁶¹. En la *ilustración 2* se muestra la distribución del tiempo en el alistamiento de pedidos, donde se evidencia que el viaje para la búsqueda y recuperación de pedidos es el que más tiempo consume.

⁶¹ ROUWENHORST, Bart, et al. Op. Cit.

Ilustración 2. Distribución del tiempo de alistamiento de pedidos



Fuente: TOMPKINS, James et al. Planeación de instalaciones. Traducido por: Patricia Solorio. 4 ed. Granjas México, Cengage Learning Editores, 2011.

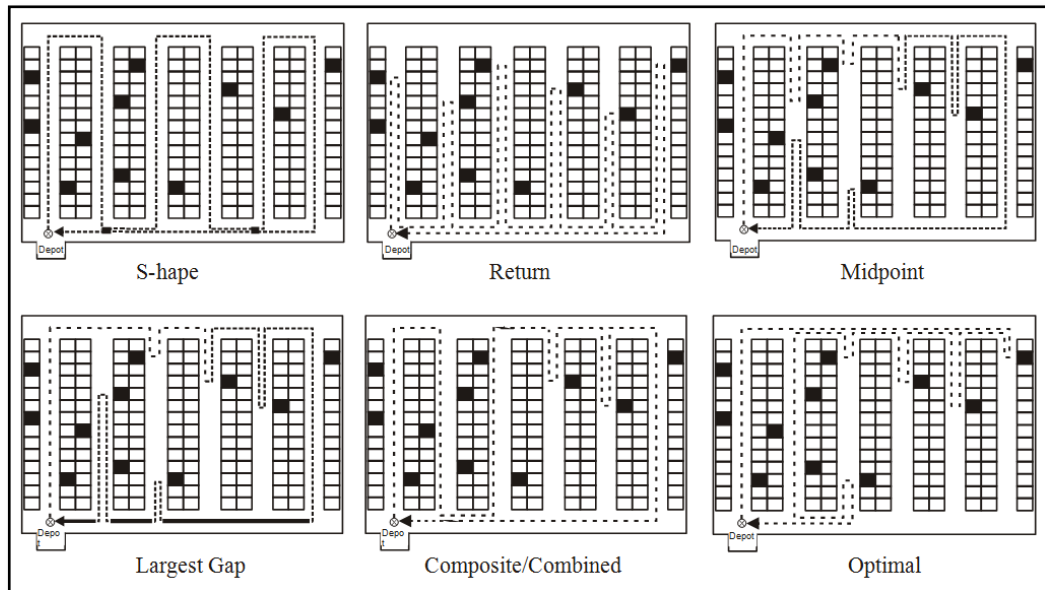
Hasta el momento, ya han sido descritas algunas estrategias para reducir los tiempos de viajes, sin embargo, no se ha mencionado el diseño de rutas como alternativa de optimización. Esta alternativa sugiere la creación de listas de pedido, donde se establece el orden de recolección al interior del almacén. EL problema de asignación de rutas para el alistamiento de pedidos es considerado como un caso especial del problema del agente viajero, donde el operario parte desde un punto inicial y debe visitar un número específico de lugares, para luego volver al punto de partida. Aparentemente, la situación del agente viajero es similar al de recolección de pedidos, no obstante, existen diferencias tales como: la presencia de nodos que no deben ser visitados (cruce entre pasillos verticales y horizontales) y un nodo puede ser visitados más de una vez, por lo que este problema es clasificado como un *Steiner Travelling Salesman Problem*.⁶²

A pesar de que este problema ha sido ampliamente estudiado, en la práctica resulta conveniente usar heurísticas, debido a la variedad de distribuciones de pasillos utilizadas en los almacenes y la imposibilidad de considerar la congestión

⁶² KOSTER, René de; LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Op. Cit.

de los pasillos. La más simple de las heurísticas de ruteo es la de forma en S o transversal, donde el operario ingresa a los pasillos que contengan al menos un pedido y lo recorre en su totalidad, después de tomar todo los pedidos regresa al punto de partida. Otra heurística sencilla es la de retorno, que en esencia es igual a la transversal, a excepción de que el operario no cruza la totalidad del pasillos sino que se regresa una vez tome el pedido. Por otro lado, el método de punto medio divide el almacén a la mitad, diferenciando así una zona frontal y una zona trasera, por lo que el operario sólo accede hasta la mitad de cada zona si su acceso lo hace por el pasillo frontal o trasero según sea el caso. Al igual que el método de punto medio, la brecha más larga resulta ser un método en el que un operario ingresa a un pasillo y lo recorre hasta tomar el pedido más lejano, luego regresa y continúa su travesía por los demás pasillos. Una combinación de estos dos últimos métodos resulta un método compuesto. Estos métodos inicialmente fueron desarrollados para almacenes de un bloque, pero pueden ser adaptados de acuerdo a las necesidades de almacenamiento. En la ilustración 3 se muestran algunos métodos heurísticos para la recolección de pedidos.

Ilustración 3. Métodos de recolección de pedidos

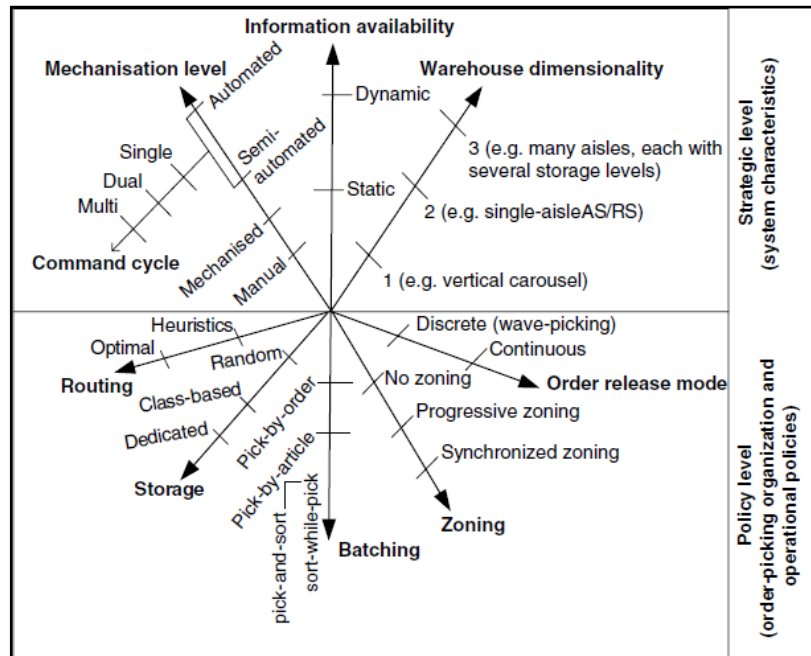


Fuente: KOSTER, René de; LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Design and control of warehouse order picking: A literature review. p 451

La realización del alistamiento de pedidos puede ser efectuada de dos formas: En la primera de ellas el operario viaja a lo largo de los pasillos y toma los productos de los estantes, de ahí a que reciba el nombre de sistema manual o *picker-to-part*. Este sistema manual, es de bajo nivel cuando el operario toma los productos de los estantes mientras camina por los pasillos, o de alto nivel cuando el viaje es realizado en vehículos que se detienen automáticamente enfrente del producto requerido. Como segunda opción para efectuar el alistamiento de pedidos están los sistemas automatizados o *part-to-picker*, donde los productos requeridos son llevados directamente al operario por una grúa automática⁶³.

⁶³ BALLOU, Ronald. Logística: Administración de la cadena de suministro. 5 ed. Naucalpan, México. Pearson Educación, 2004. ISBN 0 13 066184 8

Ilustración 4. Complejidad de los sistemas de alistamiento



Fuente: KOSTER, René de; LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Design and control of warehouse order picking: A literature review. p 492

La elección y diseño del sistema de alistamiento es una tarea compleja al estar ligada a factores externos tales como la demanda, los programas operativos del cliente y las estrategias de mercadeo, y a factores internos como los sistemas de información, el nivel de automatización, las dimensiones y distribución del almacén. Los niveles de complejidad del alistamiento de pedidos se muestran en la *ilustración 4*, donde la complejidad del sistema aumenta a medida que se aleja del origen.

En la práctica, el sistema de alistamiento puede estar conformado por varias estrategias y políticas, por ejemplo, una asignación de almacenamiento puede funcionar mejor si se establecen unas rutas de recolección, pero puede que esto no suceda con otra estrategia. Por lo que incluir todas las estrategias en un único sistema de alistamiento puede resultar en un modelo intratable.

D. Embarque

Ya cumplidas las etapas anteriormente descritas, sólo haría falta el embarque del pedido para poner a disposición del cliente los productos o insumos requeridos.

Esta última operación en el flujo interno de los almacenes no sólo se encarga de programar el envío de los pedidos, sino que también incluye actividades como el embalaje, clasificación y rotulación, lo que facilitan las operaciones de recepción beneficiando así al cliente⁶⁴.

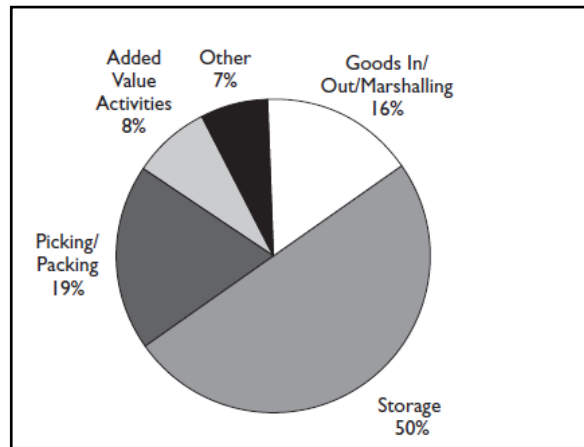
Para la cadena de suministro los sistemas de embarque han adoptado un rol importante al actuar como una conexión física entre los clientes y proveedores. Estos sistemas permiten responder de manera adecuada a iniciativas como los sistemas justo a tiempo (JIT) y de respuesta eficiente al consumidor (ERC), aparte de influenciar futuras relaciones cliente-proveedor⁶⁵.

El desempeño del almacén depende en gran medida de la adecuada ejecución de cada una de sus funciones, para lo que se hace indispensable contar con un espacio conveniente. En la *ilustración 5* se muestra el porcentaje de utilización del espacio en el almacén por cada actividad.

⁶⁴ BAKER, Peter; CROUCHER, Phil y RUSTHON, Alan. The handbook of logistics & distribution management. 5 ed. [s.l.], Kogan Page, 2010. p. 290. ISBN 978 7494 57143

⁶⁵ TOMPKINS, James et al. Op. Cit. p. 394

Ilustración 5. Uso del espacio en el almacén



Fuente: BAKER, Peter; CROUCHER, Phil y RUSTHON, Alan. The handbook of logistics & distribution management. p 232.

El almacenamiento como función básica de los almacenes es la actividad con mayor utilización de espacio, dando cumplimiento a uno de los objetivos del almacén. Posteriormente, el alistamiento y el empaqueo de pedidos, actividades que suelen ser realizadas conjuntamente, consumen un área similar a la de recepción y embarque de pedidos, lo que concierne a un área sustancial del almacén. Finalmente, es interesante observar que las actividades que agregan valor emplean un área reducida en los almacenes, hecho entendible si se tiene en cuenta que algunas de estas actividades son realizadas conjuntamente con las demás actividades del almacén; por ejemplo, la clasificación y rotulación agregan valor al cliente, pero son realizadas en el embarque, utilizando el área destinada para esta actividad.

5.2 DISEÑO DE ALMACENES

El diseño de almacenes es un aspecto aparentemente sencillo, pero que en la práctica resulta ser una tarea sumamente compleja, donde los resultados de cada etapa generan conflictos con los objetivos del almacén⁶⁶.

El proceso para diseñar una nueva instalación consiste en una serie de pasos que son realizados de manera iterativa, es decir, las decisiones tomadas en un determinado momento pueden ocasionar cambios en decisiones tomadas previamente. De manera general, se establece que los pasos a seguir para el diseño son⁶⁷:

1. Definir la estructura general o diseño conceptual
2. Establecer la capacidad y dimensiones del almacén
3. Definir la distribución de los departamentos
4. Elección de equipo
5. Definir la estrategia de operación

PASO 1: En este primer paso se determinan las características que debe tener el nuevo almacén, por lo que el diseñador debe tener conocimiento del espacio disponible, políticas de operación y equipo de manejo de materiales. Aunque esta información no debe ser exacta, si debe ser proporcionada, pues permite evaluar diferentes alternativas preliminares en orden de satisfacer los requerimientos de capacidad, flujo, presupuesto y espacio.

PASO 2: Después de evaluar las alternativas de diseño y seleccionar las que mejor se adaptan a los requerimientos de la empresa, se procede a determinar la

⁶⁶ PÉREZ HERRERO, Mariano. Almacenamiento de Materiales: Como diseñar y gestionar almacenes optimizando todos los recursos de los procesos logísticos. Barcelona, Marge Books, 2006. P 35. Colección: Biblioteca de logística. ISBN 84 86684 59 5

⁶⁷ GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem. Op. Cit

capacidad del almacén, que se traduce en las dimensiones de los diversos departamentos. Esta etapa tiene importantes implicaciones en los costos de construcción, manipulación de materiales e inventarios.

PASO 3: Una vez definidas las dimensiones de cada departamento, se establece su distribución, dando prioridad al área de almacenamiento. En esta etapa se define el número y características de los estantes, orientación de los pasillos y la ubicación de los puntos de acceso, decisiones que son de gran importancia debido a su influencia en los costos de construcción, mantenimiento y manipulación de materiales, además de tener repercusiones en la capacidad de almacenamiento, flujo de mercancías y utilización de equipo.

PASO 4: La elección del equipo determina el grado de automatización del almacén y el tipo de sistemas de almacenamiento y manipulación de materiales a utilizar, por lo que corresponde a una decisión de tipo estratégica. El diseñador, junto a los involucrados debe considerar herramientas como los arboles de decisión y la comparación de costos y características para poder hacer la elección adecuada, dado que el equipo escogido puede afectar decisiones anteriormente tomadas⁶⁸.

PASO 5: Finalmente se establecen las políticas de operación del almacén, las cuales suelen ser estrategias de almacenamiento y estrategias de alistamiento. Como se verá más adelante, esta decisión también tiene serias implicaciones en pasos previos, pues la planificación de espacio está estrechamente relacionada con las políticas de almacenamiento, por lo que no es recomendable cambiarlas con frecuencia. La elección del diseño final se da después de comparar los costos de operación, inversión, nivel de servicio y flexibilidad de diferentes opciones.

La decisión de diseñar un almacén es tomada por las empresas cuando se planea instalar un nuevo almacén, ampliar el almacén existente o reorganizarlo. De estas tres situaciones, las dos primeras conciernen a decisiones trascendentales para la empresa y la cadena de suministro, ya que tienen un impacto a mediano y

⁶⁸ BAKER, Peter; CROUCHER, Phil y RUSTHON, Alan. Op. Cit. P 302

largo plazo, además de requerir una alta inversión. No obstante, cualquiera que sea la situación, la decisión de diseño debe ser estudiada minuciosamente, puesto que una gran parte de los costos logísticos por operación de los almacenes son definidos en esta etapa⁶⁹. Por este motivo se dice que un buen diseño de almacén es aquel que permite:

- Aprovechar eficientemente el espacio
- Reducir la manipulación de materiales
- Reducir costos
- Mejorar el flujo de productos
- Mejorar el servicio al cliente
- Proveer condiciones adecuadas de trabajo
- Flexibilidad en la colocación de productos

A pesar de que estas cualidades aplican para la gran mayoría de almacenes, no todos ellos son iguales, puesto que el diseño de estas disposiciones está sujeto al tipo de producto a almacenar, los recursos financieros de la empresa, el ambiente competitivo y las necesidades del cliente⁷⁰. La división interna de los almacenes por su parte, no se ve supeditada a estas limitantes, por lo que generalmente se establece de forma precisa las zonas de: carga y descarga, almacenamiento, preparación de pedidos.

5.2.1 Zonas de Carga y Descarga. Las zonas de carga y descarga son aquellas áreas que están destinadas a las funciones de recepción y embarque, por lo que el diseño y los requerimientos de su espacio están sujetos al tipo de mercancías a

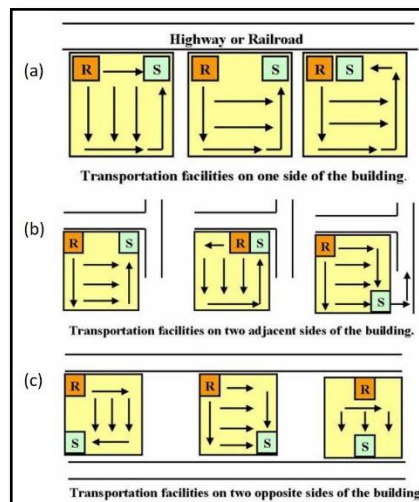
⁶⁹ ROUWENHORST, Gerrit et al. Op.Cit.

⁷⁰ LAMBERT, Douglas; STOCK, James y ELLRAM, Lisa. Fundamentals of Logistics Management. s.l, McGraw-Hill, 1998. p 300.

recibir y embarcar, el número y tipo de plataformas y los requerimientos de espacio dentro del almacén⁷¹.

La determinación del número y tipo de plataformas a utilizar en estas zonas cobra gran importancia, pues se debe tomar en consideración el transporte como una parte integral del diseño. El diseñador de las instalaciones debe incluir los vehículos de carga y las políticas de recepción y envío del almacén (ventanas de tiempo) como elementos claves del diseño. Por ejemplo, un almacén puede establecer que la recepción de mercancías se dé sólo en la mañana y el embarque de pedidos en la tarde, por lo que podría utilizar las mismas plataformas, personal y equipo de trabajo. De hecho, las funciones de recepción y embarque podrían utilizar recursos compartidos si en la fase de diseño se decidiera centralizar estas dos funciones, pero la ubicación de estas zonas puede variar dependiendo del acceso a las instalaciones de transporte como se observa en la *ilustración 6*.

Ilustración 6. Posibles distribuciones para la recepción y el embarque



Fuente: LAMBERT, Douglas; STOCK, James y ELLRAM, Lisa. Fundamentals of Logistics Management. s.l, McGraw-Hill, 1998

⁷¹ TOMPKINS, James et al. Op. Cit. p 399

En general, la función de recepción se encarga del control de calidad, la clasificación de las mercancías recibidas y la preparación de unidades de carga, entre otras actividades, por lo que al interior del almacén se debe disponer de un espacio adecuado y preferiblemente independiente del resto del almacén para poder cumplir con sus funciones de manera satisfactoria. Esta misma consideración también aplica para el embarque de pedidos, pues esta función requiere de un espacio específico dentro del almacén, destinado al embalaje, clasificación y rotulación⁷².

5.2.2 Zona de almacenaje. El cumplimiento de los objetivos del almacén se debe en gran medida a la correcta planeación del diseño de su área de almacenamiento, cuya función es maximizar el uso del espacio, equipo y personal, mientras permite la obtención de los artículos deseados de forma rápida y sin involucrar su integridad. Para la consecución de estos objetivos, el diseñador debe considerar las características del producto, la determinación del espacio a utilizar y la asignación de áreas de almacenamiento, así como la determinación de la distribución de los pasillos, con el fin de generar una planificación de instalaciones óptima.

- *Planificación del espacio*

La cantidad de espacio destinada para cada producto está directamente relacionada con las políticas de almacenamiento. Una compañía puede decidir asignar lugares fijos o dedicados de acopio, mas debe contar con el espacio suficiente para guardar la cantidad máxima de cada producto. En el caso contrario, donde se opta por la asignación de lugares móviles o aleatorios, la cantidad de

⁷² PÉREZ HERRERO, Mariano. Op. Cit. P 54

espacio demanda equivale al nivel máximo de inventario del almacén en un periodo cualquiera⁷³.

Al comparar estas políticas respecto al uso de espacio, se encuentra que el almacenamiento aleatorio demanda de áreas menores en relación con el almacenamiento dedicado. Este comportamiento se debe a los espacios vacíos que deben esperar a ser ocupados por un producto de características similares al producto que fue extraído, lo que no sucede con la asignación de lugares móviles. Conociendo las ventajas operativas del almacenamiento dedicado y el aprovechamiento del espacio del almacenamiento aleatorio, el diseñador junto a los involucrados en el proyecto de almacén, pueden optar por un almacenamiento dedicado por clases (ABC), que se basa en una combinación de estas dos políticas, por lo que su espacio planificado es un punto intermedio.

- *Asignación de áreas*

La zona de almacenamiento puede estar formada por una única sección o segmentarse en varias, como es el caso de la estrategia Forward-Reserve. Esta segmentación sugiere la formación de un área delantera (Forward Area) y un área de reserva (Reserve Area), donde cada una cumple funciones que ya han sido descritas, por lo que sólo se hará énfasis en su diseño.

La planeación de estas dos áreas no solo comprende la determinación de los productos a almacenar en cada área y su respectiva cantidad, pues incluye a su vez el dimensionamiento de las áreas, los sistemas de almacenamiento y la distribución de los pasillos.

El dimensionamiento o la planificación del espacio de estas dos áreas está sujeto a una variación en la política de almacenamiento dedicado basado en clases, dado que en el área delantera se almacena una cantidad específica de ciertos

⁷³ TOMPKINS, James et al. Op. Cit. p 416

productos en lugares determinados, mientras que en el área de reserva al contener la totalidad de los productos y en grandes cantidades, es conveniente almacenar de manera aleatoria.

Los objetivos y funciones de estas dos áreas son distantes entre sí, por lo que sus sistemas de almacenamiento también lo son. Para el tipo de áreas donde prima el volumen sobre la accesibilidad, como sucede con el área de reserva, resulta beneficioso usar sistemas de almacenamiento como el apilamiento en bloques. Sin embargo, para el área delantera la prioridad no es aprovechar el espacio, sino facilitar la accesibilidad a los productos y su rotación, por lo que el almacenamiento en estanterías convencionales resulta ser una alternativa tentadora. En la tabla 2 se muestra la eficacia de algunos sistemas de almacenamiento.

Tabla 2. Grado de eficacia de los sistemas de almacenamiento

Grado de eficacia almacenamiento	Sistema de almacenamiento					
	Bloque puro	Estanterías compactas	Estanterías convencionales	Estanterías pasillos estrechos	Estanterías dinámicas	Estanterías móviles
Utilización del volumen	100%	65%	50%	55-80%	80%	80%
Utilización efectiva	75%	75%	100%	90%	70%	100%
Preparación de pedidos	10%	30%	100%	100%	40%	100%
Velocidad movimiento de pallets	Muy alta	Escasa	Buena	Buena	Alta	Buena
Aplastamiento de la mercancía	Mucho	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Poco	Ninguno
Estabilidad de la carga	Pobre	Buena	Buena	Buena	Regular	Buena
Flexibilidad de la instalación	-	Regular	Buena	Regular	Escasa	Difícil
Rotación existencias	Pobre	Pobre	Buena	Buena	Excelente	Buena
Acceso a carga individual	Mala	Mala	Excelente	Buena	Mala	Buena

Fuente: TOMPKINS, James et al. Planeación de instalaciones. Traducido por: Patricia Solorio. 4 ed. Granjas México, Cengage Learning Editores, 2011.

Una vez establecidas las dimensiones de las áreas y sus sistemas de almacenamiento, se debe determinar la distribución de los pasillos.

A pesar de que los pasillos frecuentemente son considerados como una pérdida de espacio de almacenamiento, la formación de un reducido número de estos puede causar un desperdicio de espacio y dificultar el acceso a los productos, por este motivo en el diseño de las zonas de almacenamiento es recomendable evaluar diferentes alternativas de distribución de pasillos, número de estantes a utilizar y la longitud de cada estante para garantizar el aprovechamiento óptimo del espacio sin comprometer la accesibilidad.

5.2.3 Zona de alistamiento de pedidos. La zona de alistamiento de pedidos está estrechamente relacionada con las otras zonas del almacén, por lo que no puede ser observada de manera independiente.

En la fase de diseño de cualquier almacén, la elección del tipo de zona a utilizar y su configuración es una decisión relevante debido a las repercusiones que tiene en los costos de construcción y operación del almacén. Claramente se puede distinguir dos tipos de zona de alistamiento como

- Zona de alistamiento integrada

Este tipo de zona es utilizado en los almacenes con políticas de almacenamiento aleatorio, donde todos los productos se ubican deliberadamente evitando así la diferenciación de una zona independiente para el alistamiento.

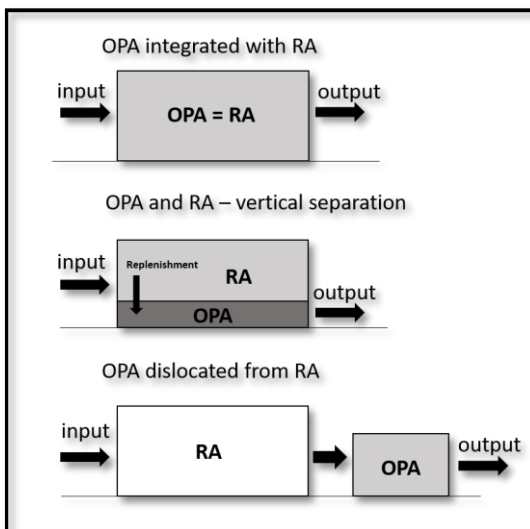
- Zona de alistamiento separada

Cuando un almacén dispone de un área exclusiva para el almacenamiento y otra zona dedicada al alistamiento de pedidos, se puede concebir como un almacén con zonas separadas. Estas zonas pueden ser ubicadas en los mismos estantes, donde la zona de alistamiento se sitúa en la parte inferior del estante y la zona de almacenamiento en la parte superior, esta diferenciación es conocida como

separación vertical. Otra forma de diferenciar estas zonas, es la asignación de zonas desarticuladas en el almacén. A diferencia de las zonas integradas, este tipo de zonas son más estricta con las ubicaciones para almacenar los productos, lo que facilita la rotación y accesibilidad. Por otro lado, al estar diferenciadas, se debe incurrir en un costo adicional por reaprovisionamiento de la zona de alistamiento.

En la *ilustración 7* se representan las zonas integradas y las zonas separadas.

Ilustración 7. Configuración de las zonas de alistamiento y almacenamiento



Fuente: ĐURĐEVIĆ, Dragan B y MILJUŠ, Momčilo D. The procedure proposal for order pick área design. p 17

Las características que han sido descritas para este tipo de zonas corresponden a las mismas de la estrategia Forward-Reserve, de hecho, la estrategia Forward-Reserve diferencia entre zonas de almacenamiento y alistamiento, siendo el área de reserva la encargada de almacenar y la zona delantera la del alistamiento de pedidos, y su ubicación también puede ser en los mismos estantes o en áreas separadas.

6. FORMULACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

Para poder determinar las dimensiones óptimas del área de almacenamiento, la orden de pedido y la cantidad a almacenar de cada SKU en el área delantera, se plantea un modelo matemático para cada uno de los siguientes modelos de distribución: El primero de estos modelos es presentado en la literatura, donde considera una distribución de pasillos verticales. Como alternativas de diseño, se propone un modelo de distribución con pasillos horizontales y un modelo con el área delantera situada en el centro del almacén.

Para el desarrollo de los modelos se asume el uso de estantes y anaqueles en el área delantera y de reserva respectivamente. A continuación, se presentan los parámetros, variables y supuestos asumidos en la investigación.

Índices

i: Tipo de SKU

Parámetros

A_b : Suma del ancho del pasillo y dos veces la profundidad del estante (Área Delantera)

A_f : Suma del ancho del pasillo y dos veces la profundidad del anaquel (Área de Reserva)

A_s : Ancho del estante

A_p : Ancho del anaquel

A_i : Costo fijo por ordenar reaprovisionamiento externo del SKU i

C_{a1} : Costo de construcción por unidad de área del área delantera

C_{a2} : Costo de construcción por unidad de área del área de reserva

C_w : Costo de construcción por unidad de longitud de los muros

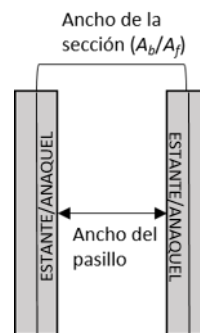
C_i : Costo anual por mantenimiento de inventarios del SKU i

C_o : Costo de alistamiento de pedidos por unidad de distancia viajada
 C_p : Costo de aprovisionamiento del área de reserva por distancia viajada
 C_r : Costo de reaprovisionamiento del área delantera por distancia viajada
 D_i : Demanda anual del SKU i
 N_p : Número de paradas (picks) por viajes de alistamiento
 N_r : Número promedio de viajes de alistamiento al año
 V_p : Número neto de productos almacenados por estiba
 B_b : Factor de utilización del espacio en el área delantera
 B_f : Factor de utilización del espacio en el área de reserva
 W_e : Ancho del pasillo central
 S_i : Inventario de seguridad del SKU i
 T : Horizonte de tiempo planeado para la operación del almacén
 r : Tasa de descuento
 Z : Valor presente neto del factor de descuento

Donde: $Z = \sum_{i=1}^T (1 + r)^{-t}$

Tanto para el área delantera como de reserva, se considera la suma de dos veces profundidad del estante o anaquel. Esto se hace para dividir el área de almacenamiento en secciones, y así facilitar la estimación de las dimensiones. En la ilustración 8 se muestra un ejemplo de estas secciones.

Ilustración 8. Ancho de sección



Por otro lado, Z representa el valor presente de la tasa de descuento o de oportunidad para un horizonte de tiempo de operación del almacén

Variables

Y_i : Número de pasillos en el área delantera

Y_2 : Número de pasillos en el área de reserva

Y_{w1} : Número de estantes por pasillos en el área delantera

Y_{w2} : Número de anaqueles por pasillo en el área de reserva

Q_i : Orden de pedido del SKU i en unidades de volumen

Ca_i : Cantidad a almacenar en el área delantera del SKU i en unidad de volumen

Supuestos

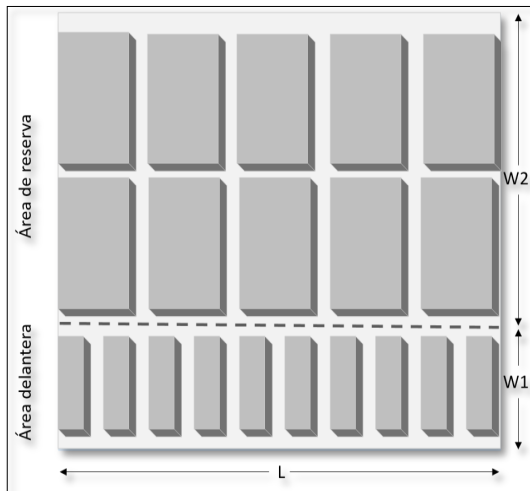
- La demanda es constante en el horizonte de tiempo de planeación
- El reaprovisionamiento del área delantera se asume como instantáneo, de tal manera que un SKU es reaprovisionado cuando su nivel de inventario llegue a 0. El reaprovisionamiento externo se da cuando el inventario del SKU alcanza el nivel de inventario de seguridad. El tiempo de reaprovisionamiento externo está dado por el nivel de inventario y la demanda
- El almacenamiento se da de manera aleatoria
- Los recorridos al interior de las áreas se hace siguiendo una estrategia de ruteo transversal o en S
- Todos los SKU serán almacenados en el área delantera
- Los pedidos de los clientes son tomados en el área delantera
- El reaprovisionamiento del área de reserva se hace por estiba, mientras que en el área delantera puede ser realizado en un único viaje

6.1 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS VERTICALES

El planteamiento del modelo matemático para las tres distribuciones estudiadas busca minimizar costo del ciclo de vida del almacén, por este motivo, se plantea una función objetivo compuesta por un costo de construcción, un costo de manipulación y un costo de inventarios, que varían según la distribución de los pasillos y la ubicación del área delantera.

El primer modelo a estudiar es presentado por Jinxiang Gu⁷⁴, quien minimiza el costo del ciclo de vida del almacén para una distribución de pasillos verticales, además de disponer el área delantera en la parte frontal del almacén, como indica la ilustración 9.

Ilustración 9. Distribución de pasillos verticales



Dónde:

$$\text{Ancho del almacén} = L = Y_l * A_f$$

$$\text{Profundidad del área delantera} = W_1 = Y_{w1} * A_s$$

$$\text{Profundidad del área de reserva} = W_2 = Y_{w2} * A_p$$

⁷⁴ GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem. Op Cit

Conociendo las expresiones que representan las dimensiones del almacén, es posible plantear la función de costo para cada uno de los componentes de la función objetivo, así:

- *Costo de construcción*

El costo de construcción empleado en esta distribución es modelado en función del área delantera, de reserva y del perímetro del almacén, de acuerdo al modelo propuesto por Francis y White⁷⁵. El costo de construcción se define como:

$$\text{Costo de construcción} = (C_{a1} * L * W_1) + (C_{a2} * L * W_2) + 2 * C_w * (W_1 + W_2 + L) \quad (1)$$

- *Costo de manipulación*

La manipulación de materiales en el área de almacenamiento inicia con la recepción de la mercancía entrante, luego se le asigna un lugar de almacenamiento de manera aleatoria en el área de reserva y finalmente el operario regresa a recibir la mercancía restante a almacenar. Asumiendo una aproximación continua de la distancia rectilínea, el recorrido del operario se calcula como:

$$\text{Distancia recorrida} = \frac{2}{L * W_1} * \int_0^{W_2} \int_{-L/2}^{L/2} \{|X| + |Y|\} dx dy$$

Al integrar esta función, se encuentra que la distancia recorrida es:

$$\text{Distancia recorrida} = \frac{L}{2} + W_2$$

A partir de esta distancia, se puede estimar el costo de manipulación en el área de reserva por el aprovisionamiento externo (AE):

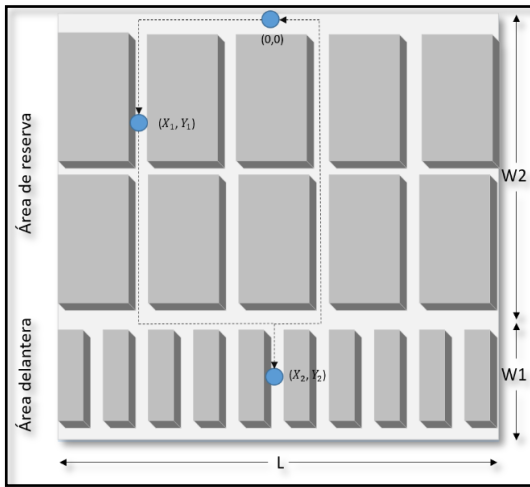
⁷⁵ WHITE, John y FRANCIS, Richard. Op Cit

$$\text{Costo manipulación por AE} = C_p * \left(\frac{L}{2} + W_2 \right)$$

$$\text{Costo anual de manipulación por AE} = \sum_i C_p * \left(\frac{L}{2} + W_2 \right) * \frac{D_i}{V_p} \quad (2)$$

Como ya ha sido mencionado, el área delantera debe ser aprovisionada por el área de reserva, lo cual implica costos adicionales por manipulación. Este proceso de aprovisionamiento interno inicia cuando el operario toma los productos del área de reserva y los lleva al área delantera; una vez allí, ubica de manera aleatoria los productos, para finalmente regresar al área de reserva, este recorrido se muestra en la ilustración 10.

Ilustración 10. Aprovisionamiento interno



La distancia recorrida en este proceso también puede ser calculada como una aproximación continua de distancias rectilíneas.

$$\text{Distancia recorrida: } \frac{2}{L^2 * W_1 * W_2} * \int_{W_2}^{W_2+W_1} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{W_2} \int_{-L/2}^{L/2} \{ |X_1 - X_2| + |Y_1 - Y_2| \} dx_1 \cdot dy_1 \cdot dx_2 \cdot dy_2$$

Al integrar la función, se obtiene la expresión para estimar la distancia recorrida y subsecuentemente el costo de aprovisionamiento interno (AI).

$$\text{Distancia recorrida} = \frac{2}{3}L + W_1 + W_2$$

$$\text{Costo de manipulación por AI} = C_r * \left(\frac{2}{3}L + W_1 + W_2 \right)$$

$$\text{Costo anual de manipulación por AI} = \sum_i C_r * \left(\frac{2}{3}L + W_1 + W_2 \right) * \frac{D_i}{Ca_i} \quad (3)$$

Como tercer costo de manipulación, está el costo asociado al alistamiento de pedidos. Este proceso inicia cuando la orden de pedido de un cliente es convertida en una lista, donde se especifica la ubicación de cada producto, su cantidad y el orden de recogida. Luego de esto, un operario se dirige al área delantera donde sigue las indicaciones de la lista y toma los pedidos del cliente, para finalmente dirigirse a la zona de expedición con el pedido recolectado.

Considerando una estrategia de ruteo transversal y almacenamiento aleatorio, la distancia recorrida en el alistamiento según Hall⁷⁶ está dada por:

- Una distancia longitudinal que depende de los valores máximos y mínimos de paradas por viaje de alistamiento.

La distancia esperada es igual a dos veces la distancia entre la parada más lejana a la izquierda y la parada más lejana a la derecha, y se expresa así:

$$\text{Distancia Longitudinal} = 2 * L * \left[\frac{N_p - 1}{N_p + 1} \right]$$

- Una distancia transversal que considera la probabilidad de que un pasillo se deba hacer al menos una parada de recolección. Adicionalmente se

⁷⁶ HALL, Randolph W. Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse. En: IIE transactions, 1993, vol. 25, no 4, p. 76-87.

considera la posibilidad de que la última parada sea en el centro de un pasillo o en el pasillo más lejano.

$$Distancia\ Transversal = W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l - 1}{Y_l} \right)^{N_p} \right] + 0.5W_1$$

Dado que Y_l es el número de pasillos en el área de almacenamiento y N_p el número de paradas por viaje, la expresión entre corchetes representa la probabilidad de ingresar a un pasillo para hacer al menos una parada de recolección

Considerando estas dos expresiones, la distancia recorrida en el alistamiento de pedidos y su costo son:

$$Distancia\ de\ alistamiento = 2 * L * \left[\frac{N_p - 1}{N_p + 1} \right] + W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l - 1}{Y_l} \right)^{N_p} \right] + 0.5W_1$$

$$Costo\ de\ alistamiento = C_0 * \left(2 * L * \left[\frac{N_p - 1}{N_p + 1} \right] + W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l - 1}{Y_l} \right)^{N_p} \right] + 0.5W_1 \right)$$

$$Costo\ anual\ de\ alistamiento = C_0 * N_r * \left(2 * L * \left[\frac{N_p - 1}{N_p + 1} \right] + W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l - 1}{Y_l} \right)^{N_p} \right] + 0.5W_1 \right) \quad (4)$$

El costo anual por manipulación es calculado como la suma de las expresiones 2,3 y 4, es decir, como la suma del costo anual de manipulación por aprovisionamiento interno, aprovisionamiento externo y alistamiento de pedidos.

- *Costo de inventarios*

Una política de inventario busca responder a las preguntas ¿Cuánto pedir? y ¿Cuándo pedir?, de tal manera que las respuestas minimicen el siguiente modelo de costo:

Costo total de inventario = Costo de preparación + Costo de almacenamiento

Por lo que el modelo de costo de inventarios empleado para esta disposición es:

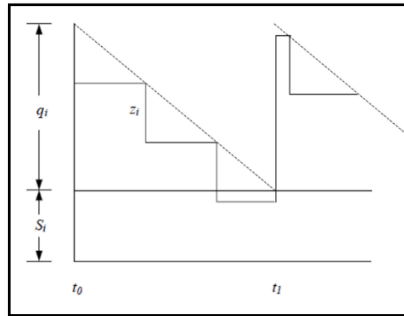
$$\text{Costo total de inventario} = \sum_i \left\{ A_i \frac{D_i}{Q_i} + C_{i*} \left(\frac{Q_i}{2} + S_i \right) \right\} \quad (5)$$

Adicional a estos tres elementos de costos, se debe considerar las restricciones de capacidad del almacén, las cuales están función de la cantidad de producto almacenado tanto en el área de reserva como en el área delantera.

El nivel de inventario del almacén sigue el patrón de la ilustración 11, donde la línea punteada representa el nivel de inventario total y la línea continua el nivel de inventario en el área de reserva, y t_0 y t_1 son los instantes en los que se debe realizar el reaprovisionamiento externo.

En el instante t_0 , el nivel de inventario en el área de reserva es igual a la suma del inventario de seguridad y la cantidad económica de pedido, menos la cantidad a almacenar en el área delantera, debido a que en este instante el almacén se encuentra desocupado. Por otro lado, cuando el almacén alcanza un nivel de operación continua el inventario en el área de reserva se limita a contener el inventario de seguridad y la cantidad económica de pedido, mientras que el área delantera sólo contiene las unidades asignadas para cada SKU.

Ilustración 11. Niveles de inventarios



Fuente: GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem. Op Cit

Una vez conocidas las cantidades a almacenar en cada área, se procede a determinar los requerimientos de espacio para cada una de ellas. Una posibilidad para hacer esta estimación de espacio es mediante el factor de escalonamiento, que establece una relación entre el espacio requerido para satisfacer la demanda y el espacio requerido para almacenar el nivel máximo de todos los SKU, por lo que el factor de escalonamiento toma valores entre 0 y 1.

$$\text{Factor de escalonamiento} = \frac{\text{Espacio requerido para satisfacer la demanda}}{\text{Suma de los niveles máximos de inventario de cada SKU}}$$

El diseño de almacén debe disponer de suficiente espacio para garantizar que los productos sean almacenados en el área delantera y de reserva, según sea el caso, por lo que se debe cumplir:

$$\text{Espacio requerido para satisfacer la demanda} \leq \text{Espacio disponible}$$

O lo que es equivalente a:

$$\text{Suma de los niveles máximos de inventario de cada SKU} \leq \frac{\text{Espacio disponible}}{\text{Factor de escalonamiento}}$$

El factor inverso de escalonamiento puede ser entendido como el requerimiento de espacio por unidad de área; Sharp⁷⁷ establece que la utilización de espacio es afectada por factores como: eficiencia volumétrica, lugares vacíos y fluctuaciones cíclicas, por lo que define el factor de utilización (B_b y B_f) en función del área esperada por pasillo y del número de estibas por unidad de área. Haciendo uso de este factor de utilización, los requerimientos de espacio para el área delantera y de reserva se expresa así:

$$\text{Área de reserva: } \sum_i(Q_i + S_i) \leq B_b * L * W_2 \quad (6)$$

$$\text{Área delantera: } \sum_i C a_i \leq B_f * L * W_1 \quad (7)$$

En resumen, se define una función objetivo que representa el costo del ciclo de vida del almacén, incluyendo el costo de construcción y el valor neto del costo discontinuo de operación. Como restricciones se considera la capacidad de cada una de las áreas. El modelo considerado para esta disposición es:

$$\text{Minimizar } (x) = \text{Costo de construcción} + Z * (\text{Costo de manipulación} + \text{Costo de inventario})$$

$$S.A \quad \sum_i(Q_i + S_i) \leq B_b * L * W_2 \quad (8)$$

$$\sum_i C a_i \leq B_f * L * W_1 \quad (9)$$

$$Q_i, C a_i \geq 0, \forall i \quad (10)$$

$$Y_l, Y_{w1}, Y_{w2} \in Z_+^3 \quad (11)$$

Las restricciones 8 y 9 garantizan que se cumplan con los requerimientos de espacio, mientras que la restricción 10 indica que se debe almacenar SKUs en las dos áreas de almacenamiento. En número de pasillos y el número de estantes y anaqueles es número entero, por lo que la restricción 11 asegura que esto se cumpla.

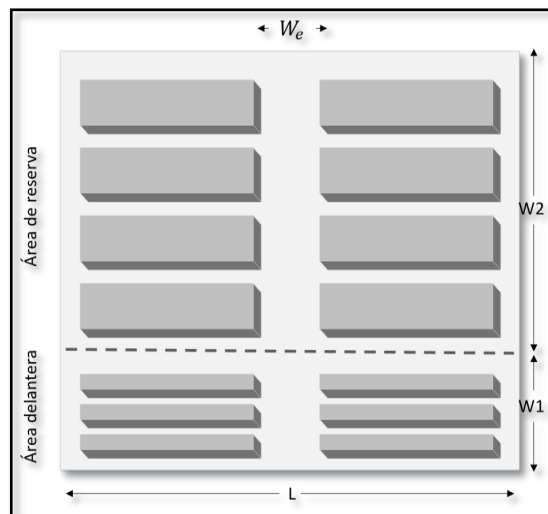
⁷⁷ SHARP, Gunter. Warehouse management. En: Handbook of industrial engineering Technology and operations Management. 3 ed. New York: John Wiley, 2001. p. 2083-2110.

6.2 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS HORIZONTALES

El modelo de distribución de pasillos horizontales es presentado como una primera alternativa al modelo estudiado en la literatura. Este tipo de distribución ubica los pasillos de manera horizontal, dejando entre ellos un pasillo central para permitir el flujo de mercancías.

A diferencia del anterior modelo, el ancho del almacén está dado por el número de estantes por pasillo en el área delantera, mientras que el largo del área de reserva depende del número de pasillos y no del número de anaqueles por pasillo. En la ilustración 12 se presenta esta distribución.

Ilustración 12. Distribución de pasillos horizontales



Al igual que el modelo anterior, se asume que el área delantera se encuentra en la parte frontal del almacén, el almacenamiento es aleatorio y se sigue una estrategia de ruteo transversal.

Teniendo en cuenta las semejanzas y diferencias entre los dos modelos, las dimensiones del almacén y los componentes de costo están dados por:

$$\text{Ancho del almacén} = L = Y_{w1} * A_s + W_e$$

$$\text{Profundidad del área delantera} = W_1 = Y_l * A_f$$

$$\text{Profundidad del área de reserva} = W_2 = Y_2 * A_b$$

- *Costo de construcción*

Asumiendo de nuevo la función de costo propuesta por Francis y White⁷⁸. El costo de construcción se define como:

$$\text{Costo de construcción} = (C_{a1} * L * W_1) + (C_{a2} * L * W_2) + 2 * C_w * (W_1 + W_2 + L) \quad (12)$$

- *Costo de manipulación*

Las actividades de aprovisionamiento de mercancías no varían, por lo que los costos asociados a la manipulación por aprovisionamiento externo e interno se siguen modelando como una aproximación continua de las distancias rectilíneas, al igual que las ecuaciones (2) y (3).

$$\text{Costo anual de manipulación por AE} = \sum_i \{ C_p * \left(\frac{L}{2} + W_2 \right) * \frac{D_i}{V_p} \} \quad (13)$$

$$\text{Costo anual de manipulación por AI} = \sum_i \{ C_r * \left(\frac{2}{3} L + W_1 + W_2 \right) * \frac{D_i}{C_{ai}} \} \quad (14)$$

Contrario a estas dos actividades, el costo por alistamiento de pedidos varía debido a la nueva orientación de los pasillos en el área delantera. Caron, Marchet

⁷⁸ WHITE, John y FRANCIS, Richard. Op Cit

y Perego⁷⁹ evalúan y comparan las distancias esperadas para dos estrategias de ruteo (transversal y de retorno) en un sistemas de almacenamiento de operación manual con pasillos horizontales.

Se encuentra que el modelo propuesto por estos autores es similar al modelo sugerido por Hall⁸⁰ en cuanto a la distancia viajada al interior de los pasillos, pero varia en las distancias viajadas para acceder a estos. Mientras Caron et al. plantean su modelo en función de un número conocido de pasillos, Hall lo hace en función del número de paradas por viaje de alistamiento. Dado que en la presente investigación se considera el número de pasillos como una variable, se opta por adaptar el modelo de Hall a una distribución de pasillos horizontales, donde la distancia calculada es similar a la de Caron, como se demostrará en la siguiente sección.

$$\text{Distancia propuesta por Caron} = L * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l - 1}{Y_l} \right)^{Np} \right] + 2 * A_f * \left[\frac{Y_l}{2} - \sum_{j=1}^{Y_l/2} \left(\frac{2*j}{Y_l} \right)^{Np} \right]$$

$$\text{Distancia propuesta por Hall} = 2 * L * \left[\frac{Np-1}{Np+1} \right] + W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l - 1}{Y_l} \right)^{Np} \right] + 0.5W_1$$

$$\text{Variación en la propuesta de Hall} = W_1 * \left[\frac{Np-1}{Np+1} \right] + L * Y_l * \left[1 - \left(\frac{2*Y_l-1}{2*Y_l} \right)^{Np} \right]$$

Considerando esta adaptación, el costo anual por alistamiento de pedidos es igual a:

$$\text{Costo de alistamiento} = C_0 * N_r * \left(2 * W_1 * \left[\frac{Np-1}{Np+1} \right] + L * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l - 1}{2*Y_l} \right)^{Np} \right] + 0.5L \right) \quad (15)$$

⁷⁹ CARON, Franco; MARCHET, Gino y PEREGO, Alessandro. Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. *En: International Journal of Production Research*, 1998, vol. 36, no 3, p. 713-732.

⁸⁰ HALL, Randolph W. Op. Cit.

El costo total por manipulación en la distribución de pasillos horizontales es igual a la suma de los costos de manipulación por aprovisionamiento externo, interno y alistamiento, es decir, la suma de las ecuaciones 13, 14 y 15.

- *Costo de inventarios*

La función de costo de inventarios es invariable para las tres distribuciones estudiadas, por lo que nuevamente se expresa como:

$$\text{Costo total de inventario} = \sum_i \left\{ A_i \frac{D_i}{Q_i} + C_{i*} \left(\frac{Q_i}{2} + S_i \right) \right\} \quad (16)$$

La función objetivo presentada para esta disposición es:

$$\text{Minimizar } (x) = \text{Costo de construcción} + Z * (\text{Costo de manipulación} + \text{Costo de inventario})$$

$$S.A \quad \sum_i (Q_i + S_i) \leq B_b * L * W_2 \quad (17)$$

$$\sum_i C a_i \leq B_f * L * W_1 \quad (18)$$

$$Q_i, C a_i \geq 0, \forall i \quad (19)$$

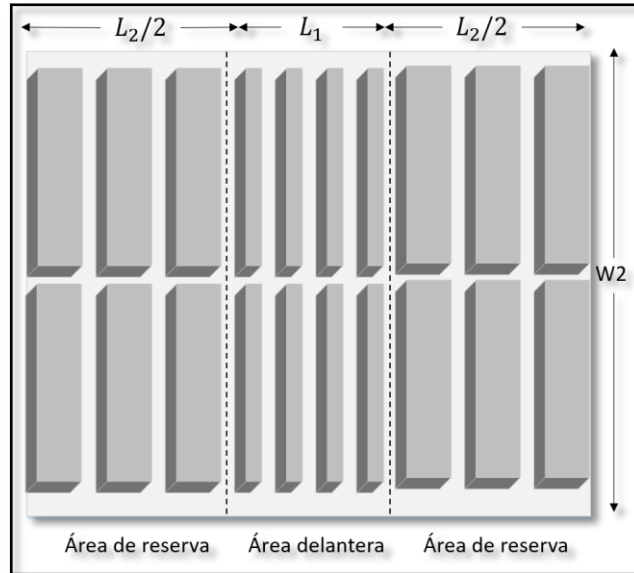
$$Y_l, Y_{w1}, Y_{w2} \in Z_+^3 \quad (20)$$

Las expresiones 17 y 18 aseguran que haya espacio suficiente para satisfacer los requerimientos de cada área, la expresión 19 garantiza que se almacenen SKUs en las dos áreas, finalmente la expresión 20 hace que el número de pasillos y el número de estantes y anaqueles sea un entero

6.3 MODELO DE DISTRIBUCIÓN CON ÁREA CENTRAL

Esta propuesta de distribución ubica el área delantera en el centro del almacén, lo cual difiere de las dos propuestas anteriores, donde el área delantera se situaba en la parte frontal. Adicionalmente se asume una distribución de pasillos de manera vertical como lo indica la ilustración 13.

Ilustración 13. Distribución de pasillos con área central



De acuerdo a la notación utilizada en los dos modelos anteriores, las dimensiones del almacén para esta propuesta están dadas por:

$$\text{Ancho del almacén} = L = L_1 + L_2$$

$$\text{Profundidad del almacén} = W_2 = Y_{w2} * A_p$$

$$\text{Ancho del área de reserva} = L_2 = Y_2 * A_b$$

$$\text{Ancho del área delantera} = L_1 = Y_1 * A_f$$

- *Costo de construcción*

El costo de construcción para esta tercera distribución se calcula de igual manera que en las dos propuestas anteriores, considerando los cambios en las dimensiones de las áreas de almacenamiento, por ejemplo, la profundidad del área delantera es igual a la profundidad del área de reserva.

$$\text{Costo de construcción} = (C_{a1} * L_1 * W_1) + (C_{a2} * L_2 * W_1) + 2 * C_w * (W_1 + L) \quad (21)$$

- *Costo de manipulación*

Las actividades de manipulación se ejecutan de igual manera que en las distribuciones anteriores, pero la distancia recorrida varía debido al cambio de las dimensiones de las áreas de almacenamiento. Las expresiones empleadas para calcular las distancias recorridas por aprovisionamiento son:

$$\text{Distancia recorrida para AE: } \frac{2}{L * W_2} * \int_0^{W_2} \int_{-L_2/2}^{L_2/2} \{|X| + |Y| dx dy\}$$

$$\text{Distancia recorrida AI: } \frac{4}{L^2 * W^2} * \int_{L_2/2}^{\frac{L_2+L_1}{2}} \int_{-W_1/2}^{W_1/2} \int_0^{L_2/2} \int_{-W_1/2}^{W_1/2} \{|X_1 - X_2| + |Y_1 - Y_2| dx_1 dy_1 dx_2 dy_2\}$$

Al integrar estas expresiones se obtiene la distancia recorrida en el aprovisionamiento externo e interno, y automáticamente el costo anual por manipulación de aprovisionamiento, como expresan las ecuaciones 14 y 15.

$$\text{Costo anual de manipulación por AE} = \sum_i \{C_p * \left(\frac{L_2}{2} + W_2\right) * \frac{D_i}{V_p}\} \quad (22)$$

$$\text{Costo anual de manipulación por AI} = \sum_i \{C_r * \left(\frac{4}{3}L + W_1 + W_2\right) * \frac{D_i}{ca_i}\} \quad (23)$$

Por otro lado, la distribución de los pasillos se asemeja al primer modelo estudiado, motivo por el cual el costo de alistamiento es igual.

$$\text{Costo de alistamiento} = C_0 * N_r * \left(2 * L * \left[\frac{N_p-1}{N_p+1}\right] + W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l-1}{Y_l}\right)^{N_p}\right] + 0.5W_1\right) \quad (24)$$

- *Costo de inventario*

$$\text{Costo total de inventario} = \sum_i \{A_i \frac{D_i}{Q_i} + C_{i*} \left(\frac{Q_i}{2} + S_i\right)\} \quad (25)$$

Finalmente la función objetivo para el costo del ciclo de vida del almacén es:

$$\text{Minimizar } (x) = \text{Costo de construcción} + Z * (\text{Costo de manipulación} + \text{Costo de inventario})$$

$$S.A \quad \sum_i (Q_i + S_i) \leq B_b * L * W_2 \quad (26)$$

$$\sum_i C a_i \leq B_f * L * W_1 \quad (27)$$

$$Q_i, C a_i \geq 0, \forall i \quad (28)$$

$$Y_l, Y_{w1}, Y_{w2} \in Z_+^3 \quad (29)$$

Las restricciones 26 y 27 garantizan que se cumplan con los requerimientos de espacio, mientras que la restricción 28 indica que se debe almacenar SKUs en las dos áreas de almacenamiento. En número de pasillos y el número de estantes y anaqueles es número entero, por lo que la restricción 29 asegura que esto se cumpla.

7. APLICACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1 CÁLCULO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

Los modelos planteados anteriormente son problemas no lineales enteros mixtos, y pueden ser solucionados por diversos métodos, como lo es el algoritmo de Solución Generalizado de Bender.

Jinxiang Gu⁸¹ estima los valores óptimos de la primera distribución mediante este algoritmo, y compara los resultados con el método de solución de GAMS/CONOPT, encontrando que los dos son equivalentes. Dado que el interés de esta investigación se centra en el tipo de distribución y no en el método de solución, se opta por usar GAMS/CONOPT como herramienta de solución y los parámetros usados por Jinxiang Gu, con el fin de comparar y validar los resultados. En la tabla 3 se muestran los parámetros considerados para las tres distribuciones.

Tabla 3. Parámetros de operación

PARÁMETROS DE OPERACIÓN	
A_B	8
A_F	20
A_S	4
A_P	4
A_I	Uniform [20,100]
C_{A1}	30
C_{A2}	25
C_W	100
C_I	Uniform [0.3,6.5]
C_O	0.0068
C_P	0.0024

⁸¹ GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem. Op.Cit.

Tabla 3. (Continuación)

PARÁMETROS DE OPERACIÓN	
C_R	0.0028
D_I	Uniform [10,200]
N_P	80
N_R	180
V_P	64
B_B	5.38
B_F	1.75
Z	4.191
S_I	Uniform [5,60]
W_E	5

Fuente: GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem

Los parámetros de costo fijo por ordenar reaprovisionamiento externo, costo anual por mantenimiento de inventarios y demanda siguen una distribución de probabilidad uniforme. Por otro lado, los parámetros de inventario de seguridad y número promedio de viajes de alistamiento al año no son proporcionados por la literatura, por lo que se asumen estos valores.

Los tres modelos son resueltos en GAMSIDE versión 23.5.1, en un equipo con procesador Intel Core i3 con 4 GB de RAM instalada, los códigos de programación involucrados se muestran en el anexo B. Los resultados encontrados para los tres modelos se describen a continuación.

- *Modelo de distribución con pasillos verticales*

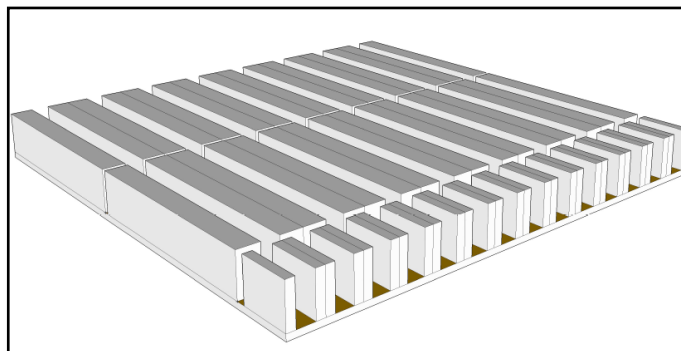
Para evaluar las variaciones en las dimensiones del almacén se consideran cinco instancias para cada disposición, donde cada una ella almacena diferentes cantidades de SKUs (600, 800, 1000, 1200,1400). En la tabla 4 se muestra las dimensiones óptimas para cada instancia y el costo del ciclo de vida del almacén cuando la distribución de los pasillos es de manera vertical.

Tabla 4. Dimensiones óptimas modelo 1

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS VERTICALES					
VARIABLE	600	800	1000	1200	1400
Y_L	11,818	14,091	15,863	17,55	19,023
Y_{w1}	2,088	2,634	3,225	3,783	4,273
Y_{w2}	20,641	24,266	26,804	29,193	31,268
L	94,544	112,728	126,904	140,4	152,184
W1	8,352	10,536	12,9	15,132	17,092
W2	82,564	97,064	107,216	116,772	125,072
W2+W1	90,916	107,6	120,116	131,904	142,164
ÁREA TOTAL	8595,562	12129,533	15243,201	18519,322	21635,086
ÁREA DELANTERA	789,631	1187,702	1637,062	2124,533	2601,129
ÁREA DE RESERVA	7805,931	10941,831	13606,139	16394,789	19033,957
COSTO	\$ 1.392.900	\$ 1.827.400	\$ 2.273.500	\$ 2.702.300	\$ 3.095.200

Dado que CONOPT resuelve problemas continuos no lineales, se redondean los valores de las variables al entero más próximo, lo que es una aproximación a una solución óptima. En la ilustración 14 se representa como sería el área de almacenamiento para una distribución de pasillos verticales y 800 tipos de SKU.

Ilustración 14. Área de almacenamiento para 800 SKU's – modelo 1



Un área de almacenamiento que contenga 800 tipos de SKU's y opere con los parámetros y supuestos asumidos, conseguirá minimizar el costo del ciclo de vida del almacén si:

- El área delantera está compuesta por 14 pasillos y 3 estantes por pasillo
- El área de reserva la componen 6 pasillos y 24 estantes por pasillo
- Si se almacenan las cantidades dadas en el anexo A para cada SKU

Las variaciones en las dimensiones del almacén son analizadas mediante una proporción de forma $((W_1 + W_2)/L)$, dónde se determina qué forma toma el almacén cuando varía la cantidad de SKU's almacenados. Adicional a esta proporción, se emplea una relación para evaluar que tanto varía el área delantera en comparación al área total del almacén. En la tabla 5 se muestran los valores de cada relación y el área total del almacén.

Tabla 5. Variación en las dimensiones del modelo 1

PASILLOS VERTICALES			
CANTIDAD	$L*(W_1+W_2)$	$(W_1+W_2)/L$	$W_1/(W_1+W_2)$
600	8595,5623	0,96162633	0,091865018
800	12096	0,96428571	0,111111111
1000	15243,2009	0,94651075	0,107396184
1200	18519,3216	0,93948718	0,114719796
1400	21635,0862	0,93415865	0,120227343

Para satisfacer los requerimientos de espacio, es evidente que el área de almacenamiento debe aumentar en función del número de SKU's almacenados. En cuanto a la proporción de forma, resulta más económico recorrer trayectos horizontales en vez de trayectos verticales, razón que lleva al almacén a optar por una forma rectangular, donde su ancho es inferior a su largo. Por otro lado, el

ancho del área delantera tiende a aumentar y así incrementar su porcentaje de participación en el almacén.

En resumen, se concluye que el área delantera de un almacén aumenta en función de los SKU's almacenados, y preferiblemente se deben recorrer distancias horizontales.

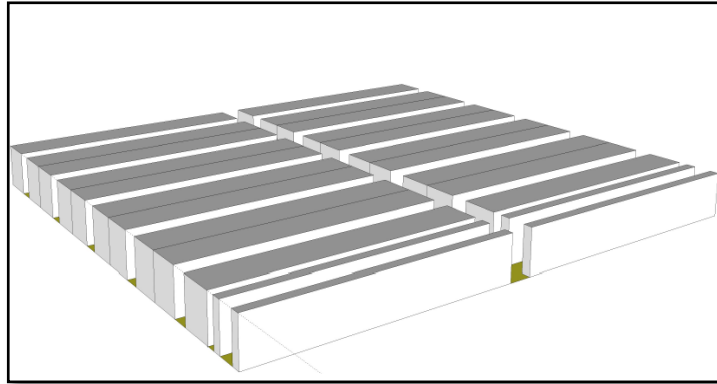
- *Modelo de distribución con pasillos horizontales*

A diferencia del modelo anterior, esta disposición considera la ubicación de los pasillos de manera horizontal, además de asignar un pasillo central para facilitar el flujo de mercancías. Las dimensiones que optimizan el costo del ciclo de vida del almacén se muestran en la tabla 6 y en la ilustración 15 se ilustra un área de almacenamiento óptima para 800 SKU's

Tabla 6. Dimensiones óptimas modelo 2

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS HORIZONTALES					
VARIABLE	600	800	1000	1200	1400
YL	1,014	1,283	1,567	1,838	2,08
Y2	4,004	4,639	5,208	5,676	6,081
YW1	24,318	28,622	32,604	36,05	39,07
YW2	0	0	0	0	0
L	102,272	119,488	135,416	149,2	161,28
W1	8,112	10,264	12,536	14,704	16,64
W2	80,08	92,78	104,16	113,52	121,62
W2+W1	88,192	103,044	116,696	128,224	138,26
ÁREA TOTAL	9019,572224	12312,52147	15802,50554	19131,0208	22298,5728
ÁREA DELANTERA	829,630464	1226,424832	1697,574976	2193,8368	2683,6992
ÁREA DE RESERVA	8189,94176	11086,09664	14104,93056	16937,184	19614,8736
COSTO	\$ 1.414.300	\$ 1.850.800	\$ 2.298.800	\$ 2.729.200	\$ 3.122.800

Ilustración 15. Área de almacenamiento para 800 SKU's – modelo 2



Para esta disposición, el área delantera debe tener un pasillo con 28 estantes, mientras que el área de reserva debe estar conformada por 5 pasillos, y cada uno de ellos con 23 anaqueles. Adicionalmente, se deben almacenar las cantidades especificadas en el anexo A

Respecto al costo del ciclo de vida del almacén, la distribución de pasillos horizontales presenta un incremento en el costo total, fenómeno que se explica por la presencia de un pasillo central, que no solo aumenta las distancias de viaje sino que también el costo por construcción, uno de los elementos que mayor aporte tiene a la función objetivo. A pesar del aumento en el costo y las dimensiones del almacén, esta distribución resulta ser más eficiente para la actividad de alistamiento de pedidos, conclusión a la que se llega después de comparar las distancias calculadas por las expresiones 4 y 15, para la instancia en que se almacenan 800 SKU's. Adicionalmente se compara la distancia calculada por el modelo de Caron y la modificación al modelo de Hall.

Tabla 7. Comparación de modelos de distancias recorridas

Distancia	Distancia Horizontal	Distancia Vertical	Distancia Total	% Variación
Caron	153.303	0	153.303	6.6%
Hall	153.303	10.136	163.439	

Tabla 8. Comparación de recorridos del modelo 1 y 2

Distribución de pasillos	Distancia Horizontal	Distancia Vertical	Total
Verticales	219.778	151.7938	371.5718
Horizontales	153,303104	10,1357	163,438804

En la tabla 7 se observa que el modelo modificado de Hall calcula un recorrido similar al modelo propuesto por Caron et al, con una variación del 6,6%. La diferencia entre estas dos distancias se atribuye al reducido número de pasillos, ya que el modelo de Caron et al depende de la distancia entre el pasillo más lejano y el punto de partida, que para este caso, coinciden. Por otro lado, en la tabla 8 se evidencia que la distancia recorrida para el alistamiento de pedidos es considerablemente menor en la segunda distribución, lo que se explica por el reducido número de pasillos, puesto que la distancia recorrida para acceder a cada uno de ellos depende de su número y su ancho.

Al igual que en la distribución anterior, se analiza la variación de las dimensiones del almacén haciendo uso de las mismas proporciones, como lo muestra la tabla 9.

Tabla 9. Variación en las dimensiones del modelo 2

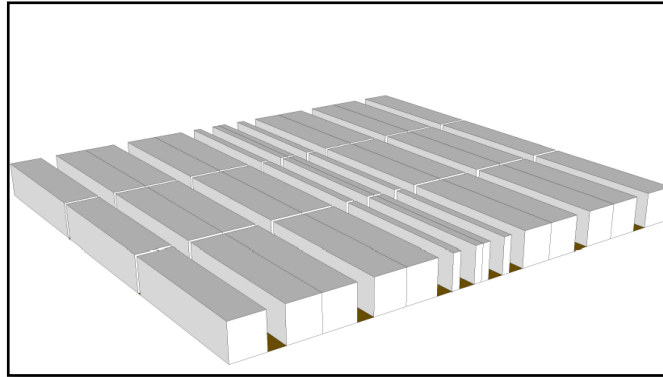
MODELO 2			
CANTIDAD	$L*(W1+W2)$	$(W1+W2)/L$	$W1/(W1+W2)$
600	9019,57222	0,86232791	0,091981132
800	12312,5215	0,86237949	0,099607934
1000	15802,5055	0,86175932	0,107424419
1200	19131,0208	0,85941019	0,11467432
1400	22298,5728	0,85726687	0,120352958

En la tercera columna de la tabla se muestra la variación en la proporción de forma del almacén, por lo que se puede inferir que: a medida que aumenta la cantidad de SKU's almacenados, la longitud del almacén va a aumentar más que su ancho, lo que resultaría en un almacén con forma rectangular. En comparación con la distribución anterior, esta disposición opta por tener una forma más alargada, facilitando así la distribución de sus pasillos. En cuanto a la cuarta columna, se concluye nuevamente que el área delantera aumenta su participación en el tamaño total del almacén conforme aumenta el número de SKU's, lo que es similar al modelo anterior.

- *Modelo de distribución con área central*

En los modelos anteriores se asumía que el área delantera se ubicaba en la parte frontal del almacén, caso que no aplica para esta tercera distribución. Este tercer modelo considera una distribución de pasillos de manera vertical y un área delantera situada en el centro del almacén, como muestra la ilustración 16

Ilustración 16. Área de almacenamiento para 800 SKU's – modelo 3



Para el caso en que se almacenen 800 SKU's el área delantera debe estar compuesta por 2 pasillos, mientras que el área de reserva debe tener 4 pasillos, 2 por cada sección. Dado que las áreas abarcan toda la profundidad del almacén, el número de estantes y anaqueles debe ser el mismo, es decir 27 estantes y 27 anaqueles, además, debe contener las cantidades especificadas en el anexo A. Las condiciones óptimas para las demás instancias se muestran en la tabla 10.

Tanto el área de reserva como el área delantera son calculadas en función de la profundidad del almacén (W_1) y del largo de su sección (L_1 para el área delantera y L_2 para el área de reserva). Al comparar el tamaño del área delantera de las tres distribuciones se encuentra que la tercera disposición posee el área con mayor tamaño, y consecuentemente un área de reserva más reducida. El aumento en el tamaño de esta área se debe a los prolongados viajes de reaprovisionamiento interno, por lo que se prefiere almacenar más unidades de SKU's en el área delantera con tal de reducir la frecuencia de reaprovisionamiento interno. De hecho, en esta tercera disposición no sólo se reduce el área de reserva sino que el área total del almacén también se ve reducida en comparación con el modelo 2, por consiguiente, el costo del ciclo de vida del almacén también es inferior. A pesar de estas mejoras en cuanto a tamaño y costo, la distribución de pasillos horizontales continúa siendo la alternativa con el menor costo de alistamiento.

Tabla 10. Dimensiones óptimas modelo 3

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS HORIZONTALES					
VARIABLE	600	800	1000	1200	1400
YL	1,274	1,621	1,991	2,349	2,669
Y2	4,243	4,945	5,575	6,105	6,567
YW1	22,978	26,898	30,477	33,531	36,189
YW2	22,978	26,898	30,477	33,531	36,189
L	95,052	111,868	127,428	140,892	152,692
W1	91,912	107,592	121,908	134,124	144,756
L1	10,192	12,968	15,928	18,792	21,352
L2	84,86	98,9	111,5	122,1	131,34
ÁREA TOTAL	8736.419	12036,102	15534,493	18896,999	22103,083
ÁREA DELANTERA	936.767	1395,253	1941,751	2520,458	3090,830
ÁREA DE RESERVA	7799,652	10640,849	13592,742	16376,540	19012,253
COSTO	\$ 1.408.200	\$ 1.849.100	\$ 2.302.700	\$ 2.739.300	\$ 3.139.100

El análisis de variación de las dimensiones se hace en base a los valores calculados para las proporciones de forma y área, como indica la tabla 11.

Tabla 11. Variación en las dimensiones del modelo 3

MODELO 3			
CANTIDAD	$L*(W1+W2)$	W/L	$L1/(L2+L1)$
600	8736,41942	0,96696545	0,107225519
800	12036,1019	0,96177638	0,115922337
1000	15534,4926	0,95668142	0,124996076
1200	18896,9986	0,95196321	0,133378758
1400	22103,0832	0,94802609	0,139837058

El aumento en el número de SKU's incita a que el área delantera tenga una mayor participación en el área total del almacén, comportamiento que se presenta de igual manera para las otras dos disposiciones. El aumento en el número de SKU's también tiene repercusiones en la forma del almacén, ya que a medida que aumenta la variedad de productos a almacenar, la longitud del almacén se hace mayor en comparación a su ancho, lo que provoca nuevamente una forma rectangular.

7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se hace uso de las pruebas de hipótesis como herramienta de comparación. A continuación, se plantean las pruebas de hipótesis para el costo del ciclo de vida del almacén, el área total y el costo de operación.

- Prueba de hipótesis sobre el costo del ciclo de vida del almacén

Tanto para esta prueba como para las demás, se plantean hipótesis sobre las medias de dos distribuciones normales, asumiendo varianzas desconocidas e iguales.

Esta primera prueba busca comparar el costo del ciclo de vida del almacén para las tres distribuciones, por lo que se evalúa una muestra de 15 valores con un nivel de significancia del 5%. La notación y el estadístico de prueba están dadas por:

$$\mu_1 = \text{Costo promedio del ciclo de vida del almacén para la distribución 1}$$

$$\mu_2 = \text{Costo promedio del ciclo de vida del almacén para la distribución 2}$$

$$\mu_3 = \text{Costo promedio del ciclo de vida del almacén para la distribución 3}$$

$$\text{Estadístico de prueba} = t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Dónde S_p es un estimador combinado de la desviación estándar, X es el promedio de la muestra de tamaño n .

En la tabla 12 se muestra el costo promedio del ciclo de vida del almacén de las tres distribuciones y su respectiva desviación estándar.

Tabla 12. Media y desviación estándar del costo del ciclo de vida del almacén

	Disposición 1	Disposición 2	Disposición 3
Media	1433513	1455033	1449187
Desviación Estándar	22429	22513	22620

De acuerdo con estos valores y la notación ya descrita, la prueba de hipótesis sobre la igualdad de medias para las distribuciones 1 y 2 es:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Nivel de significancia = 5%

Regla de decisión: Rechazar H_0 si $t_0 > (t_{0.05; 28} = 1.701)$ o si $t_0 < (t_{0.05; 28} = -1.701)$

De la tabla 22, se tiene que $\bar{x}_1 = 1433513, s_1 = 22429, \bar{x}_2 = 1455033, s_2 = 22513, n_{1,2} = 15$

$$S_p^2 = \frac{(15 - 1) * 22429^2 + (15 - 1) * 22513^2}{15 + 15 - 2}$$

$$S_p = \sqrt{504947605} = 22471,04$$

$$t_0 = \frac{1433513 - 1455033}{22471,04 * \sqrt{\frac{2}{15}}} = -2,62$$

Conclusión: Dado que $-2.62 < -1.701$, existe evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Haciendo uso del software Minitab, se estima que el intervalo de confianza para la diferencia de las medias es de $-382328 < -21520 < -4712$, por lo que se afirma que el costo del ciclo de vida del almacén es mayor para la distribución 2.

Este mismo procedimiento se repite para las demás distribuciones, los resultados se consolidan en la tabla 13

Tabla 13. Pruebas de hipótesis sobre el costo del ciclo de vida del almacén

Prueba de hipótesis	Región de Rechazo	t_0	Intervalo de confianza para la diferencia de medias
$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-2.62	$-38328 < -21520 < -4712$
$H_0: \mu_1 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-1.91	$-32521 < -15673 < 1175$
$H_0: \mu_2 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_2 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	0.71	$-11032 < 5847 < 22726$

Conclusión prueba 2:

Dado que $-1.91 < (t_0 = -1.71)$, existe evidencia fuerte para afirmar que el costo del ciclo de vida del almacén es diferente entre las disposiciones 1 y 3, sin embargo,

el valor del estadístico está próximo a la región de aceptación, por lo que se debe usar el valor p y la potencia de la prueba para tener conclusiones más acertadas.

Con un valor $p = 0.067 > 0.05$, se podría suponer lo contrario a la anterior afirmación, es decir, no rechazar H_0 . Por otro lado, con una probabilidad de error tipo II = 0.49, la potencia de la prueba es de 0.51. Esto es, si existe diferencia entre las medias de las dos distribuciones, la prueba rechazará H_0 el 51% de las veces. Debido a que el valor de la potencia es bajo, se decide rechazar H_0 y afirmar que efectivamente los valores del costo de vida del almacén son diferentes para las dos distribuciones.

Conclusión prueba 3

A un nivel de significancia del 5% y $-1.701 < 0.71 < 1.701$, no existe evidencia suficiente para rechazar H_0 o afirmar que los valores del costo son diferentes para las dos distribuciones.

De acuerdo con las conclusiones alcanzadas en las pruebas de hipótesis, se tiene evidencia para suponer que el costo del ciclo de vida del almacén es menor para la distribución de pasillos verticales, mientras que el costo de las distribuciones de pasillos horizontales y con área central aparentemente es igual.

- Prueba de hipótesis sobre el área total del almacén (área delantera y de reserva)

Ya se ha evaluado el costo total del ciclo de vida del almacén y el costo por unidad de área, por lo que ahora se compara el área total de cada disposición, con el objetivo de determinar cuál de ellas es la que mayor espacio requiere para satisfacer los requerimientos del almacén.

La notación empleada para estas pruebas esta dada por:

$$\mu_1 = \text{Área promedio de la distribución 1}$$

$$\mu_2 = \text{Área promedio de la distribución 2}$$

$$\mu_3 = \text{Área promedio de la distribución 3}$$

En la tabla 14 se muestran los valores de la media y la desviación estándar, mientras que en la tabla 15 se muestran las tres pruebas de hipótesis.

Tabla 14. Media y desviación estándar del área total

	Disposición 1	Disposición 2	Disposición 3
Media	8692,688898	9191,032	8837,08959
Desviación Estándar	150,030795	355,5370095	152,2993275

Tabla 15. Pruebas de hipótesis sobre el área total

Prueba de hipótesis	Región de Rechazo	t_0	Intervalo de confianza para la diferencia de medias
$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-5	-702.4 < -498.3 < -294.2
$H_0: \mu_1 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-2.62	-257.5 < -144.4 < -31.3
$H_0: \mu_2 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_2 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	3.54	149.4 < 353.9 < 558.5

Conclusión prueba 1

Con un nivel de significancia del 5% y con $-5 < (t_0 = -1.701)$, se tiene evidencia significativa para afirmar que el área de las disposiciones 1 y 2 son diferentes, y de

acuerdo con el intervalo de confianza, la disposición dos requiere de mayor espacio para satisfacer los requerimientos del almacén.

Conclusión prueba 2

Dado que $-2.62 < (t_0 = -1.701)$, se afirma que con un nivel de significancia del 5% existe evidencia fuerte para rechazar H_0 y aceptar la hipótesis alternativa. Esto es equivalente a decir que la disposición 3 ocupa un área de mayor tamaño en comparación a la disposición 1.

Conclusión prueba 3

Considerando que el valor del estadístico de prueba es de $3.54 > (t_0 = 1.701)$, existe evidencia significativa para afirmar que el área de las dos disposiciones es diferente, inclusive se puede afirmar que la disposición 2 ocupa mayor espacio, esto puede ser corroborado en el intervalo de confianza, donde la diferencia estimada toma un valor positivo.

En resumen, existe evidencia suficiente para concluir que la disposición de pasillos verticales es la que menor espacio ocupa, siendo seguida por la disposición con área central y la disposición de pasillos horizontales. Estos resultados también permiten hacer deducciones sobre el costo de construcción, puesto que es calculado en función del área. Por lo tanto, la disposición de pasillos verticales tiene el menor costo de construcción, mientras que la disposición de pasillos horizontales es la más costosa de las tres.

- Prueba de hipótesis sobre el costo de operación del almacén

El costo de ciclo de vida del almacén está constituido por un costo de construcción, un costo de manipulación y uno por manejo inventarios, siendo estos dos últimos los responsables de la operación del almacén. Esta prueba de hipótesis se plantea con el objetivo de comparar los costos de operación de las tres disposiciones, y así poder emitir un juicio sobre cuál de ellas es la más

económica. A continuación se presenta la notación empleada para el desarrollo de la prueba.

$$\mu_1 = \text{Costo promedio de operación de la distribución 1}$$

$$\mu_2 = \text{Costo promedio de operación de la distribución 2}$$

$$\mu_3 = \text{Costo promedio de operación de la distribución 3}$$

Los valores de la media y desviación estándar se muestran en la tabla 16, mientras que en la tabla 17 se muestran las pruebas de hipótesis.

Tabla 16. Media y desviación estándar del costo de operación

	Disposición 1	Disposición 2	Disposición 3
Media	839158,1682	839774,680	847405,2616
Desviación Estándar	17678,32995	17673,1458	17758,62179

Tabla 17. Pruebas de hipótesis sobre el costo de operación

Prueba de hipótesis	Región de Rechazo	t_0	Intervalo de confianza para la diferencia de medias
$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-0.1	-13837 < -617 < -12604
$H_0: \mu_1 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-1.27	-21500 < -8247 < 5006
$H_0: \mu_2 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_2 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-1.18	-20882 < -7631 < 5620

Conclusión pruebas 1,2 y3:

Se observa que los valores del estadístico de prueba para las tres hipótesis se encuentran en la región de aceptación, por lo que a un nivel de significancia del 5%, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula. Esto permite concluir que no existe evidencia para afirmar que los valores del costo de operación son diferentes para las tres disposiciones.

8. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de experimentos forma parte del proceso científico y es uno de los medios fundamentales para conocer el funcionamiento de los sistemas y procesos. La aplicación de esta herramienta tiene amplios campos de acción y permite caracterizar y mejorar los procesos y alcanzar reducciones en costo y tiempo.

Para esta investigación, el interés se centra en caracterizar el área de almacenamiento; es decir, determinar los factores que afectan el costo del ciclo de vida del almacén. Para ello se diseña un experimento que permite estimar cuanto varía la variable respuesta cuando se modifica cada factor, y si la modificación de los factores en conjunto produce resultados diferentes a los obtenidos con la modificación individual.

Dado que se desea identificar los factores críticos de las distribuciones estudiadas, se plantean tres diseños experimentales, donde en cada uno de ellos se comparan dos distribuciones. Las pautas consideradas para el diseño de estos experimentos son:

A. Identificación y exposición del problema

El costo del ciclo de vida del almacén depende de parámetros como la demanda, el número de viajes al año, el costo por reaprovisionamiento y el nivel de inventario, etc. Además de estos parámetros, se sospecha que el tipo de distribución también influye en el costo del ciclo de vida. Por estos motivos se plantea un diseño experimental que permita responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué parámetros influyen en costo del ciclo de vida del almacén?
- ¿El costo del ciclo de vida se ve influenciado por el tipo de distribución?

B. Elección de los factores, rangos y niveles

Hasta el momento, no se ha observado mayor variación en las cantidades almacenadas y el tamaño de las áreas de almacenamiento, sin embargo, el costo por manipulación si ha diferido de una disposición a otra. Por este motivo y siguiendo las sugerencias de la literatura, se consideraran cuatro factores, como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. Factores, rangos y niveles del diseño experimental

Factor	Rango	Nivel
Tipo de distribución	1-2-3	Dos niveles
Número promedio de viajes de alistamiento por año (N_r)	50%	Dos niveles
Demanda	10%	Dos niveles
Costo de reaprovisionamiento interno (C_r)	50%	Dos niveles

De acuerdo con Montgomery⁸², cuando el objetivo del experimento es la caracterización, se recomienda mantener reducido el número de niveles y considerar amplios rangos para los factores.

C. Selección de la variable respuesta

El costo del ciclo de vida del almacén podría ser considerado como la variable respuesta, pero se decide tipificar esta variable al dividirla en el área del almacén.

⁸² MONTGOMERY, Douglass. Diseño y análisis de experimentos. Traducido por Rodolfo Piña García. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2007. p. 15. ISBN-13: 978-968-18-6156-6

Por lo tanto, la variable respuesta para este experimento es el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área.

D. Elección del diseño experimental

Debido a que se tiene interés por conocer no sólo el efecto de los factores principales, sino también el de sus interacciones, se opta por trabajar con un diseño factorial 2^4 con una sola replica.

E. Realización y análisis del experimento

Tal como se había mencionado anteriormente, se realizarán 3 experimentos con el objetivo de comparar las diferentes distribuciones. Posteriormente se procede a realizar el respectivo análisis del experimento

- Experimento para las distribuciones 1 y 2

Los cuatro factores son: tipo de distribución (A), número promedio de viajes de alistamiento por año (B), demanda (C) y el costo de reaprovisionamiento interno (D). En la tabla 19 se muestra los niveles de cada factor, y en la tabla 20 la matriz de diseño y los datos de respuesta obtenidos para una sola réplica del diseño 2^4

Tabla 19. Niveles de los factores

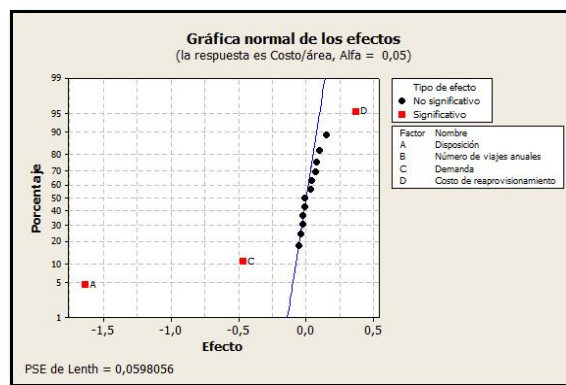
Factor	Nivel Bajo (-)	Nivel Alto (+)
Tipo de distribución	Pasillos verticales	Pasillos horizontales
Número promedio de viajes de alistamiento por año (N_r)	180	270
Demanda	Uniform (10-200)	Uniform (11-220)
Costo de reaprovisionamiento interno (C_r)	0.0028	0.0042

Tabla 20. Matriz de diseño del experimento 1

Número de corrida	Factor				Etiqueta de corrida	Costo por metro cuadrado
	A	B	C	D		
1	-	-	-	-	(1)	161,516
2	+	-	-	-	a	159,931
3	-	+	-	-	b	161,757
4	+	+	-	-	ab	159,864
5	-	-	+	-	c	161,122
6	+	-	+	-	ac	159,506
7	-	+	+	-	bc	161,213
8	+	+	+	-	abc	159,462
9	-	-	-	+	d	162,125
10	+	-	-	+	ad	160,134
11	-	+	-	+	bd	161,926
12	+	+	-	+	abd	160,451
13	-	-	+	+	cd	161,446
14	+	-	+	+	acd	159,931
15	-	+	+	+	bcd	161,286
16	+	+	+	+	abcd	160,010

El análisis de los datos comenzará con la realización de la gráfica de probabilidad normal de la estimación de los efectos, para ello se hace uso del software Minitab. La gráfica se muestra en la ilustración 17

Ilustración 17. Gráfica normal de los efectos del experimento 1



Cómo se está utilizando un diseño factorial no replicado, no es posible hacer una estimación del cuadrado medio del error, sin embargo, Daniel⁸³ sugiere un método de análisis para resolver este problema. Este método indica que aquellos efectos que sean significativos estarán fuera de la recta normal en la gráfica normal de efectos, mientras que los efectos no significativos se ubicarán sobre la línea recta. Los efectos que son aparentemente no significativos se combinan para formar una estimación del error.

De acuerdo con la ilustración 17, el efecto del número promedio de viajes de alistamiento por año (Nr) no es significativo, por lo que este factor puede descartarse, de tal modo que el experimento se convierte en un factorial 2^3 con dos réplicas. En la tabla 21 se resume el análisis de varianzas para este nuevo diseño.

Tabla 21. Análisis de la varianza para el experimento 1 en A, C y D

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F	Valor P
A	10,7298	1	10,7298	701,87	0
C	0,8687	1	0,8687	56,82	0
D	0,54	1	0,54	35,32	0
AC	0,0386	1	0,0386	2,52	0,151
AD	0,0216	1	0,0216	1,41	0,268
CD	0,0024	1	0,0024	0,16	0,7
ACD	0,0199	1	0,0199	1,30	0,287
Error	0,1223	8	0,0152875		
Total	12,3434	15			

Una vez realizado el análisis de varianzas, es posible probar hipótesis acerca del efecto de los factores principales y sus interacciones; sin embargo, no se

⁸³ CUTHERBERT, Daniel. Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two Level Experiment. Citado por MONTGOMERY, Douglass. Diseño y análisis de experimentos. México: Limusa Wiley, 2007. p. 246.

considerarán los efectos de las interacciones debido a que no son significativos, de acuerdo a la gráfica normal de efectos.

Antes de plantear las hipótesis, se define la siguiente notación:

τ_i = Efecto relacionado con el i-ésimo nivel del factor tipo de disposición.

β_j = Efecto relacionado con el factor demanda en su j-ésimo nivel.

γ_k = Efecto relacionado con el factor costo de reaprovisionamiento interno en su k-ésimo nivel.

ε_{ijk} = Error del modelo.

De acuerdo con esta notación, las pruebas de hipótesis son:

a. Hipótesis sobre el tipo de distribución

$$H_0: \tau_i = 0$$
$$H_a: \text{al menos una es diferente}$$

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

Dado que valor $p = 0 < 0.05$, existe evidencia significativa para afirmar que el tipo de disposición si tiene efecto en la variable respuesta.

b. Hipótesis sobre la demanda

$$H_0: \beta_j = 0$$
$$H_a: \text{al menos una es diferente}$$

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

A un nivel de significancia del 5% existe evidencia fuerte para afirmar que la demanda si tiene efecto sobre el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área, debido a que valor $p = 0 < 0.05$

c. Prueba de hipótesis para el costo de reaprovisionamiento interno

$$H_0: \gamma_j = 0$$

H_a : al menos una es diferente

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

Como valor $p = 0 < 0.05$ se puede afirmar que existe evidencia significativa para afirmar que el costo por reaprovisionamiento interno si afecta la variable respuesta.

Los resultados en las pruebas de hipótesis permiten concluir que el costo del ciclo de vida del almacén se ve afectado por la variación en los niveles de los factores principales. La estimación de los efectos se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Estimación de los efectos

TÉRMINO DEL MODELO	ESTIMACIÓN DEL EFECTO
A	-1,638
C	-0,466
D	0,367
AC	0,098
AD	0,074
CD	-0,025
ACD	0,071

A partir de la estimación de los efectos y las conclusiones alcanzadas con las pruebas de hipótesis, el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área está dado por:

$$\hat{y} = 160.730 + \left(\frac{-1.638}{2}\right)x_1 + \left(\frac{-0.466}{2}\right)x_2 + \left(\frac{0.367}{2}\right)x_3$$

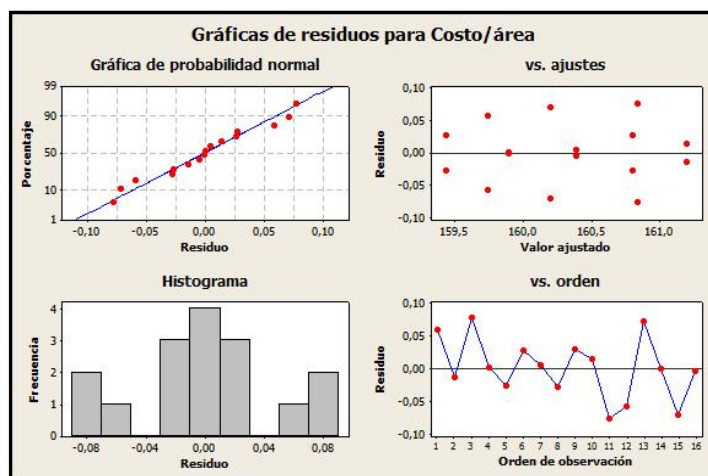
Donde 160.730 es el costo promedio por unidad de área y las variables codificadas x_1 , x_2 y x_3 asumen valores de -1 y +1 según el nivel del factor. Para corrida (1) el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área predicho es:

$$\hat{y} = 160.730 + \left(\frac{-1.638}{2}\right)(-1) + \left(\frac{-0.466}{2}\right)(-1) + \left(\frac{0.367}{2}\right)(-1) = 161.598$$

Puesto que el valor para esta corrida fue de 161.516, el residual es $y - \hat{y} = 161.516 - 161.598 = -0.0825$. Los residuales para las demás estimaciones se calculan de igual manera.

Para verificar la adecuación del modelo y el cumplimiento de los supuestos básicos, se hace un análisis de residuales, dónde se verificará el supuesto de normalidad, independencia y homocedasticidad, para lo cual se utilizará un análisis gráfico. En la ilustración 18 se muestra la gráfica de probabilidad normal de los residuales, la gráfica de residuales contra el orden de observación y la gráfica de residuos vs el ajuste.

Ilustración 18. Gráfica de residuales-experimento 1



Se observa que el supuesto de normalidad se cumple, pues los residuales se ubican sobre la recta en la gráfica de probabilidad normal. En cuanto a la independencia, no se observa algún patrón de comportamiento en los residuales, lo que permite concluir que el supuesto de independencia también se cumple. Por último, se concluye que la varianza de los residuales es homogénea, cumpliéndose así el supuesto de homocedasticidad.

- Experimento para las distribuciones 1 y 3

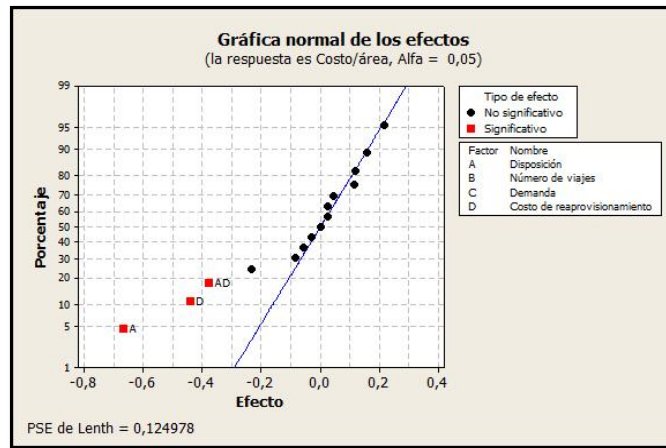
En este segundo experimento se desea determinar si la variación en el tipo de distribución afecta la variable respuesta, por lo que se considerada la distribución de pasillos verticales y la distribución con área central. En la tabla 23 se muestra la matriz de diseño y los valores de la variable respuesta.

Tabla 23. Matriz de diseño del experimento 2

Número de corrida	Factor				Etiqueta de corrida	Costo por metro cuadrado
	A	B	C	D		
1	-	-	-	-	(1)	161,198
2	+	-	-	-	a	161,087
3	-	+	-	-	b	161,556
4	+	+	-	-	ab	161,301
5	-	-	+	-	c	161,646
6	+	-	+	-	ac	161,379
7	-	+	+	-	bc	161,840
8	+	+	+	-	abc	161,313
9	-	-	-	+	d	161,821
10	+	-	-	+	ad	160,482
11	-	+	-	+	bd	161,326
12	+	+	-	+	abd	160,695
13	-	-	+	+	cd	161,442
14	+	-	+	+	acd	160,038
15	-	+	+	+	bcd	161,405
16	+	+	+	+	abcd	160,601

Debido a que el modelo continúa siendo un diseño factorial no replicado, se recurre nuevamente al método sugerido por Daniel, por lo que en la ilustración 19 se muestra la gráfica de probabilidad normal de los efectos.

Ilustración 19. Gráfica normal de los efectos del experimento 2



De acuerdo con esta gráfica, el tipo de disposición, el costo de reaprovisionamiento interno y la interacción entre estos dos factores tienen un efecto significativo en la variable respuesta, sin embargo, los factores demanda y número promedio de viajes no son significativos, razón por la cual pueden ser omitidos y generar un nuevo diseño factorial 2^2 con tres réplicas. En la tabla 24 se muestra el análisis de varianzas para este nuevo diseño.

Tabla 24. Análisis de la varianza para el experimento 2 en A y D

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F	Valor P
A	1,71434	1	1,71434	34,96	0
D	0,7263	1	0,7263	14,81	0,002
AD	0,532	1	0,532	10,85	0,006
Error	0,5884	12	0,049		
Total	3,5611	15			

Las hipótesis a probar para este segundo experimento serán con el fin de determinar si los factores A y D tienen efectos significativos sobre la variable respuesta. También se prueba si la interacción entre los dos factores tiene efecto alguno en el costo por unidad de área.

Para las pruebas de hipótesis se define la siguiente notación:

τ_i = Efecto relacionado con el i-ésimo nivel del factor tipo de disposición.

β_j = Efecto relacionado con el factor reaprovisionamiento interno en su j-ésimo nivel.

$\tau\beta_{ij}$ = Efecto relacionado con la interacción entre los factores *tipo de distribución* y *costo por reaprovisionamiento interno*.

De acuerdo con esta notación, las pruebas de hipótesis son:

a. Hipótesis sobre el tipo de distribución

$$H_0: \tau_i = 0$$

H_a : al menos una es diferente

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

A un nivel de significancia de 0.05 se tiene evidencia fuerte para afirmar que el tipo de disposición tiene un efecto considerable en la variable respuesta. Se rechaza H_0 puesto Valor $p = 0 < 0.05$

b. Hipótesis sobre el costo de reaprovisionamiento interno

$$H_0: \beta_j = 0$$

H_a : al menos una es diferente

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

Dado que valor $p = 0.002 < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula, por consiguiente, existe evidencia significativa para afirmar que el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área se ve afectado por el costo de reaprovisionamiento interno

c. Prueba de hipótesis para interacción entre los factores A y D

$$H_0: \tau\beta_{ij} = 0$$

H_a: al menos una es diferente

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

Dado que valor $p = 0.006 < 0.05$, se tiene evidencia significativa para afirmar que la interacción entre los factores A y D es significativa

Las pruebas de hipótesis permiten concluir formalmente que la variación de factores A y D, y su interacción tienen un efecto significativo en la variable respuesta. En la tabla 25 se muestran los efectos de cada factor y la interacción.

Tabla 25. Estimación de los efectos

TÉRMINO DEL MODELO	ESTIMACIÓN DEL EFECTO
A	-0,655
D	-0,426
AD	-0,365

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de hipótesis y la estimación de los efectos, se plantea el modelo de regresión:

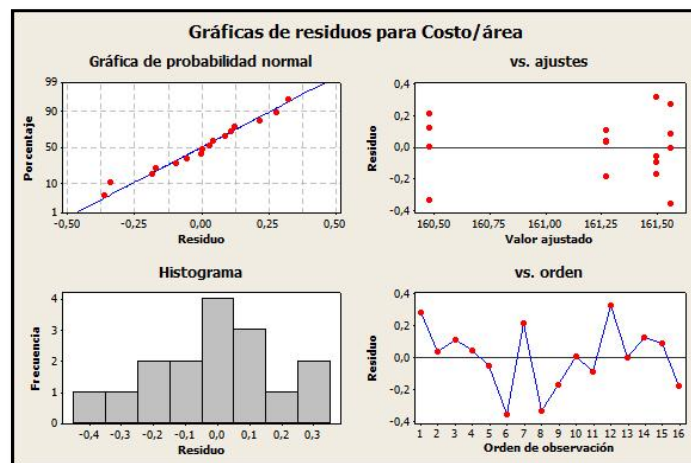
$$\hat{y} = 161.202 + \left(\frac{-0.655}{2}\right)x_1 + \left(\frac{-0.426}{2}\right)x_2 + \left(\frac{-0.365}{2}\right)x_1x_2$$

Donde 161.202 es el costo promedio por unidad de área y x_1 , x_2 y $x_1 \cdot x_2$ son variable codificadas que toman valores de -1 y +1. Para corrida (1) el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área predicho es:

$$\hat{y} = 161.202 + \left(\frac{-0.655}{2}\right)(-1) + \left(\frac{-0.426}{2}\right)(-1) + \left(\frac{-0.365}{2}\right)(1) = 161.56$$

El valor observado para la primera corrida es de 161,198, por lo tanto, el residual es: $161.56 - 161.198 = 0.362$. Este procedimiento se repite para las demás observaciones. En la ilustración 20 se muestra la gráfica de residuales para un posterior análisis sobre la adecuación del modelo.

Ilustración 20. Gráfica de residuales-experimento 2



A partir de la gráfica de residuales se puede verificar si se cumplen los supuestos de linealidad, independencia y homocedasticidad.

En la gráfica de probabilidad normal se observa que los residuales se encuentran sobre la recta o son muy cercanos, lo que permite deducir que se cumple el supuesto de normalidad. El supuesto de independencia también se cumple, puesto que en la gráfica de residuales vs orden de observación no se establece algún patrón de comportamiento. Finalmente, no se observa mayor variación en la variabilidad, por lo que el supuesto de homocedasticidad también se cumple.

- Experimento para las distribuciones 2 y 3

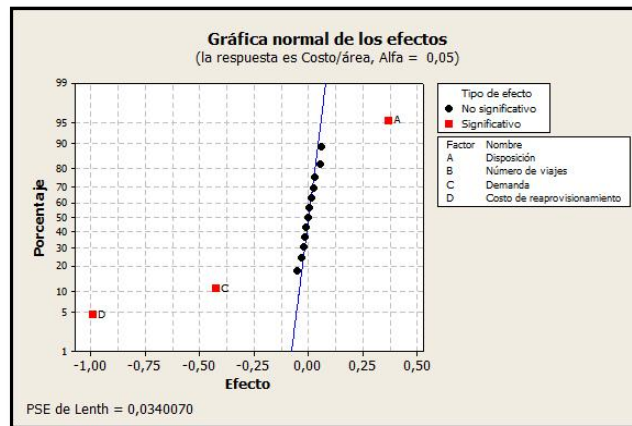
Hasta el momento, se ha estudiado el efecto sobre la variable respuesta si se cambia de una distribución tipo 1 a una distribución tipo 2 y tipo 3, sin embargo, no se ha considerado el efecto por la variación de estas dos últimas distribuciones. En la tabla 26 se muestra la matriz de diseño y los valores de la variable respuesta para el tercer experimento.

Tabla 26. Matriz de diseño del experimento 3

Número de corrida	Factor				Etiqueta de corrida	Costo por metro cuadrado
	A	B	C	D		
1	-	-	-	-	(1)	160,834
2	+	-	-	-	a	161,187
3	-	+	-	-	b	160,781
4	+	+	-	-	ab	161,215
5	-	-	+	-	c	160,396
6	+	-	+	-	ac	160,758
7	-	+	+	-	bc	160,386
8	+	+	+	-	abc	160,913
9	-	-	-	+	d	159,891
10	+	-	-	+	ad	160,132
11	-	+	-	+	bd	159,890
12	+	+	-	+	abd	160,275
13	-	-	+	+	cd	159,406
14	+	-	+	+	acd	159,684
15	-	+	+	+	bcd	159,462
16	+	+	+	+	abcd	159,801

Se recurre al método de Daniel para estimar los efectos que son significativos. En la ilustración 21 se muestra la gráfica de efectos normales.

Ilustración 21. Gráfica normal de los efectos del experimento 3



Se observa que al igual que en el primer experimento, el número promedio de viajes tiene un efecto no significativo, por lo tanto, se modifica el diseño a diseño factorial 2^3 con una réplica. En la tabla 27 se muestra el análisis de varianzas para esta modificación.

Tabla 27. Análisis de varianzas para el experimento 3 en A, C Y D

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F	Valor P
A	0,53245	1	0,53245	131,47	0
C	0,7225	1	0,7225	178,40	0
D	3,92899	1	3,92899	970,12	0
AC	0,000555	1	0,000555	0,14	0,151
AD	0,01166	1	0,01166	2,88	0,268
CD	0,00459	1	0,00459	1,13	0,7
ACD	0,00076	1	0,00076	0,19	0,287
Error	0,0324	8	0,00405		
Total	5,2339	15			

A partir de este análisis de varianzas es posible probar hipótesis sobre la significancia de los efectos de los factores principales. Se define la siguiente notación para plantear las hipótesis:

τ_i = Efecto relacionado con el i-ésimo nivel del factor tipo de disposición.

β_j = Efecto relacionado con el factor demanda en su j-ésimo nivel.

γ_k = Efecto relacionado con el factor costo de reaprovisionamiento interno en su k-ésimo nivel.

ε_{ijk} = Error del modelo.

De acuerdo con esta notación, las pruebas de hipótesis son:

a. Hipótesis sobre el tipo de distribución

$$H_0: \tau_i = 0$$

H_a : al menos una es diferente

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

Con un nivel de significancia de 0.05 se tiene evidencia significativa para afirmar que el tipo de distribución tiene efecto sobre la variable respuesta, esto concluye debido a que valor $p = 0 < 0.05$.

b. Hipótesis sobre la demanda

$$H_0: \beta_j = 0$$

H_a : al menos una es diferente

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

Dado que valor $p = 0 < 0.05$, se tiene evidencia fuerte para afirmar que la demanda si tiene efecto sobre la variable respuesta.

c. Prueba de hipótesis para el costo de reaprovisionamiento interno

$$H_0: \gamma_j = 0$$

H_a : al menos una es diferente

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Regla de decisión: Aceptar H_0 si valor $p \geq 0.05$

Como valor $p = 0 < 0.05$ se puede afirmar que existe evidencia significativa para afirmar que el costo por reaprovisionamiento interno si afecta la variable respuesta.

Los resultados en las pruebas de hipótesis permiten concluir que el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área se ve afectado por la variación en los niveles de los factores A, C y D. En la tabla 28 se muestran los efectos de estos factores y el de sus interacciones.

Tabla 28. Estimación de los efectos

TERMINO DEL MODELO	ESTIMACIÓN DEL EFECTO
A	0,365
C	-0,425
D	-0,991
AC	0,012
AD	-0,054
CD	-0,034
ACD	-0,014

Anteriormente se había mencionado que la disposición tipo 3 tenía un área delantera mayor a las otras dos disposiciones, esto con el fin de almacenar más unidades y reducir la frecuencia de los viajes de reaprovisionamiento. En la tabla

21 se confirma este hecho, puesto que la variación en los costos de reaprovisionamiento interno tiene un efecto mayor al de los otros factores.

De acuerdo con los resultados en las pruebas de hipótesis y los efectos de los factores, se plantea el siguiente modelo de regresión:

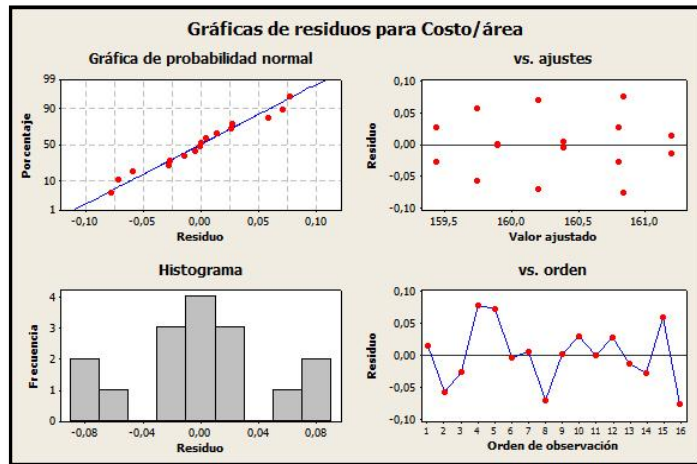
$$\hat{y} = 160.313 + \left(\frac{0.365}{2}\right)x_1 + \left(\frac{-0.425}{2}\right)x_2 + \left(\frac{-0.991}{2}\right)x_3$$

Donde X es una variable codificada que toma valores de + o – dependiendo del nivel del factor, mientras que 160.313 representa el valor promedio global de la variable respuesta. Dado este modelo de regresión, se puede predecir la variable respuesta para cualquier corrida, por ejemplo, en el caso en el que todos los factores tomen un nivel bajo o (1), el valor predicho es:

$$\hat{y} = 160.313 + \left(\frac{0.365}{2}\right)(-1) + \left(\frac{-0.425}{2}\right)(-1) + \left(\frac{-0.991}{2}\right)(-1) = 160.7135$$

El valor observado para esta corrida fue de 160.834, por lo que su residual es de 0.7205. Los residuales para las demás corridas se calculan de igual manera. Un análisis en los residuales permite corroborar si se satisfacen los supuestos básicos y verificar el modelo. En la ilustración 22 se muestran las gráficas de residuales.

Ilustración 22. Gráfica de residuales-experimento 3



El supuesto de normalidad puede ser verificado en la gráfica de probabilidad normal, donde se observa que la mayoría de los datos se ubican sobre la recta, motivo que permite afirmar que se cumple el supuesto. En la gráfica de residuales vs orden de observación no se percibe algún patrón de comportamiento, por lo tanto se cumple el supuesto de independencia. Finalmente, se evalúa el supuesto de homocedasticidad en gráfica de residuales vs ajuste, donde no se observa una mayor variación en la varianza, cumpliéndose así el último supuesto.

Al comparar los resultados de los tres experimentos se puede concluir que:

- El costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área se ve afectado por la variación en los niveles de los factores: el tipo de disposición, costo de reaprovisionamiento interno y demanda.
- La variación en la demanda no tiene efecto cuando se decide cambiar de una disposición de pasillos verticales a una disposición con área central.
- Cambiar de un tipo de disposición de pasillos verticales a cualquiera de las dos alternativas de diseño tiene un efecto negativo, es decir; el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área será menor en las disposiciones 2 y 3. No obstante, el cambiar de una disposición tipo 2 a

una tipo 3 tiene un efecto positivo, lo que es igual a un aumento en la variable respuesta. Por lo tanto, la disposición 3 tiene el menor costo por unidad de área, seguido de la disposición 2 y finalmente la disposición 1.

9. CONCLUSIONES

- En su mayoría, los trabajos estudiados sobre el “*Forward-Reserve Problem*” plantean modelos matemáticos cuya función objetivo es minimizar los costos de reaprovisionamiento, alistamiento de pedidos y requerimientos de trabajo sujetos a restricciones de capacidad en el área delantera (Forward Area). A su vez, estos trabajos consideran variables binarias para la asignación de SKUs, y en algunos casos un modelo de fluidos, lo que resulta en problemas de programación no lineal entera mixta.
- Dentro de la literatura analizada, se encuentra que el problema Forward Reserve ha venido captando la atención de los investigadores, por lo que se resalta la importancia del diseño de sistemas de almacenamiento para que operen bajo esta estrategia, puesto que un gran número de trabajos consultados asumen como conocidas las dimensiones del almacén, lo que puede limitar los resultados.
- La distancia recorrida en el alistamiento de pedidos para la distribución de pasillos horizontales es un 52% más corta que las otras dos distribuciones. Comportamiento que se atribuye al reducido número de pasillos, puesto que la distancia recorrida para acceder a cada uno de ellos depende de su número y ancho.
- Independientemente del tipo de distribución, resulta más económico recorrer trayectos horizontales en vez de trayectos verticales, razón que lleva al almacén a optar por una forma rectangular, donde su ancho es menor a su largo. Adicionalmente, el porcentaje de participación del área delantera en el almacén es mayor a medida que aumenta en número de SKU’s almacenados.
- Considerando los modelos planteados, el costo del ciclo de vida del almacén se ve afectado por la variación en los niveles de factores tales

como: el tipo de distribución, la demanda y el número promedio de viajes de alistamiento por año.

- Al evaluar los resultados obtenidos, se encuentra que la distribución de pasillos verticales es la mejor opción de diseño para un área de almacenamiento. A pesar de que esta distribución tiene el mayor costo por unidad de área, es la distribución con el menor costo del ciclo de vida del almacén y la menor área; es decir, los requerimientos del almacén van a ser satisfechos en un área más reducida en comparación con las otras distribuciones, y a un menor costo.
- Con un nivel de significancia del 5 %, no existe evidencia suficiente para suponer que el costo de operación (manipulación e inventarios) sea diferente en las tres distribuciones.
- El uso de herramientas como GAMS/CONOPT resulta ser adecuado cuando el número de SKUs y la demanda toman valores reducidos, sin embargo, para problemas de mayor envergadura, se debe considerar otros métodos de solución como la Solución Generalizada de Bender, un algoritmo codicioso, un algoritmo Branch and Bound o meta-heurísticas como los algoritmos genéticos, búsqueda tabú y recocido simulado.

10. RECOMENDACIONES

- Como recomendación para investigaciones futuras, se sugiere la consideración de otras distribuciones de pasillos, por ejemplo, una distribución en U, en espina de pescado o una combinación de las distribuciones estudiadas en el presente trabajo.
- Con el objetivo de facilitar el alistamiento de pedidos, se podría considerar el almacenamiento dedicado en el área delantera, además de evaluar estrategias de ruteo diferentes a la transversal.
- En el presente trabajo, se ha considerado que todos los SKUs son almacenados en el área delantera, sin embargo, podría resultar más útil si se clasificaran los SKUs a almacenar en cada una de las áreas de acuerdo a un índice de rotación. Por este motivo, se recomienda clasificar los SKUs a almacenar, lo que generaría modificaciones en el costo de alistamiento de pedidos y de reaprovisionamiento interno, adicionalmente se debe incluir una variable binaria para establecer la ubicación de cada SKU.

BIBLIOGRAFÍA

A.T. Kearny's Logistics Excellence in China Study [en línea]. Chicago, Illinois. A.T. Kearny.2010. Disponible en:<<https://www.atkearney.com/documents/10192/dbbb7c71-fdc1-4f26-a9f5-0ebf9712e39b>>

BAKER, Peter; CROUCHER, Phil y RUSTHON, Alan. The handbook of logistics & distribution management. 5 ed. [s.l], Kogan Page, 2010. 679 p. ISBN 978 7494 57143

BALLOU, Ronald. Logística: Administración de la cadena de suministro. 5° edición. Naucalpan, México. Pearson Educación, 2004. 808 p. ISBN 0-13-066184 8

BARTHOLDI, John J.; HACKMAN, Steven T. Warehouse & distribution science: release 0.92. Atlanta, GA, The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2011.Disponible en: www.warehouse-science.com

BARTHOLDI, John y HACKMAN, Steven. Allocating space in a forward pick area of a distribution center for small parts. En: IIE Transactions. Febrero, 2008. vol 40. no 11, p. 1046-1053

BASSAN, Yoseph; ROLL, Yaakov y ROSENBLATT, Meir. Internal layout design of a warehouse. En: AIIE Transactions, 1980, vol. 12. no 4, p. 317-322.

CAKMAK, Emre, et al. Determining the size and design of flow type and u-type warehouses. En: Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, vol. 58, no 58, p. 1425-1433.

CARON, Franco; MARCHET, Gino y PEREGO, Alessandro. Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. En: International Journal of Production Research, 1998, vol. 36, no 3, p 713-732.

CUTHERBERT, Daniel. Use of Half-Normal Plots in Interpreting Factorial Two Level Experiment. Citado por MONTGOMERY, Douglass. Diseño y análisis de experimentos. México: Limusa Wiley, 2007.

ĐURĐEVIĆ, Dragan B. y MILJUŠ, Momčilo D. THE PROCEDURE PROPOSAL FOR ORDER PICK AREA DESIGN. En: Tehnicki vjesnik/Technical Gazette. Febrero, 2013, vol. 20.

FOLTZ, Christopher y RAMAKRISHNAN, Sreejanth. A Novel Methodology to Allocate Commodities and Re-Layout a Warehouse. En: Industrial Engineering Research Conference (30-3, mayo-junio: Miami). Nueva York. IBM Corporation. 2009.

FRAZELLE, Edward et al. The Forward Reserve Problem. En: Optimization in industry 2. Nueva York, John Wiley y Sons, Inc, 1994. p. 43-61

FRAZELLE, Edward. The Definition, Evolution and Role of Logistics in Business. En: Supply Chain Strategy. United States: McGrawHill, 2001.

GOETSCHALCKX, Marc. Warehousing Systems Design. [Diapositivas]. Atlanta, Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology. 2000. 18 diapositivas.

GU, Jinxiang. The Forward Reserve Warehouse Sizing and Dimensioning Problem. Tesis de doctorado. Atlanta: Georgia Institute of Technology. 2005

GU, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marc y MCGINNIS, Leon. Research on warehouse design and performance evaluation: a comprehensive review. En: European Journal Operational Research. Agosto. 2010. vol 203, no 3, p 539-549

HACKMAN, Steven; ROSENBLATT, Meir y OLIN, Jhon. Allocating items to an automated storage and retrieval system. En: IIE Transactions. Febrero, 1990. Vol. 22. no 1, p 7-14.

HALL, Randolph W. Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse. En: IIE transactions, 1993, vol. 25, no 4, p. 76-87.

HSIEH, Ling-feng; TSAI, Lihui. The optimum design of a warehouse system on order picking efficiency. En: The International journal of advanced manufacturing technology, 2004, vol. 28, no 5-6, p 626-637.

HUANG, Simin et al. An integrated model for site selection and space determination of warehouses. En: Computer and Operations Research. Noviembre, 2014. vol 62, p 169-176

HUN, Şilan. Algorithms for dynamic forward area allocation in a warehouse. Tesis de maestría. Estambul, Turquía. 2005.

HUNG, M. S, y FISK, John. Economic sizing of warehouses: A linear programming approach. En: Computers & Operations Research, 1984, vol. 11, no 1, p 13-18

JENKINS, Creed H. Modern Warehouse Management. S.I.: McGraw-Hill, 1968.

KOSTER, René de; LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Design and control of warehouse order picking: A literature review. En: European Journal of Operational Research. Octubre, 2006. no 182. p 481-501.

LAMBERT, Douglas; STOCK, James y ELLRAM, Lisa. Fundamentals of Logistics Management. s.I, McGraw-Hill, 1998.

LIN, Che-Hung y LU, Iuan-Yuan. The procedure of determining the order picking strategies in distribution center. En: International Journal of Production economics. 1999. Vol 60, p 301-307.

MALMBORG, C. J. Analysis of storage assignment policies in less than unit load warehousing systems. En: International Journal of Production Research. 1998, vol. 36, no 12, p 3459-3475.

MONTGOMERY, Douglass. Diseño y análisis de experimentos. Traducido por Rodolfo Piña García. 2 ed. México: Limusa Wiley, 2007. ISBN-13: 978-968-18-6156-6

MORA GARCÍA, Luis Aníbal. Gestión logística en centros de distribución, bodegas y almacenes. Bogotá D.C: Ecoe Ediciones, 2011. ISBN: 978-958-648-722-1.

NGUYEN, Tim; USHER, Jon y DEPUY, Gail. The Forward-Reserved problem with Seasonal Demand. En: IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial Engineers. 2005.

PANDIT, R y PALEKAR, U. S. Response time considerations for optimal warehouse layout design. En: Journal of engineering for industry, 1993, vol. 115, no 3, p 322-328

PARIKH, Pratik J y MELLER, Russell D. Selecting between batch and zone order picking strategies in a distribution center. En: Transportation Research Part E. Marzo, 2007. Vol 44, no 5, p 696-719.

PARK, Young, y WEBSTER, Dennis B. Modelling of three-dimensional warehouse systems. En: The international journal of production research, 1989, vol. 27, no 6, p 985-1003.

PÉREZ HERRERO, Mariano. Almacenamiento de Materiales: Como diseñar y gestionar almacenes optimizando todos los recursos de los procesos logísticos. Barcelona, Marge Books, 2006. P 35. Colección: Biblioteca de logística. ISBN 84-86684-59-5

PETERSEN, Charles G. An evaluation of order picking policies for mail order companies. En: Production and Operations Management. Invierno, 2000. Vol 9, no 4, p 319-335.

RAO, M.R Y RAO, A.K. Solutions procedures for sizing of warehouses. En: European Journal of Operational Research. Abril, 1998. vol 108, p 16-25.

Revista de logística [en línea]. LEGIS. Enero 2016. En: <<http://revistadelogistica.com/actualidad/diez-elementos-claves-en-el-diseno-logistico-de-un-cedi/>>.

ROODBERGEN, Kees Jan y VIS, Iris FA. A model for warehouse layout. En: IIE transactions, 2006, vol. 38, no 10, p 799-811.

ROUWENHORST, Bart, et al. Warehouse design and control: Framework and literature review. En: European Journal of Operational Research. Febrero, 2000. vol 122, no 3, p 515-533.

SHARP, Gunter Pielbusch; VLATSA, Dimitra y HOUMAS, Constantin George. Economics of storage/retrieval systems for item picking. En: Material Handling Research Center, Georgia Institute of Technology, 1994.

SHARP, Gunter. Warehouse management. En: Handbook of industrial engineering Technology and operations Management. 3 ed. New York: John Wiley, 2001. p. 2083-2109.

THOMAS, Lisa y MELLER, Russell. Developing guidelines for a case-picking warehouse. En: International Journal of Production Economics. Diciembre 2015. vol 170, parte C, p. 741-762.

TOMPKINS, James et al. Planeación de instalaciones. Traducido por: Patricia Solorio. 4 ed. Granjas México, Cengage Learning Editores, 2011, p. 394-415. ISBN 978 470 44404 7.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RIO GRANDE DO SUL. Projeto de Armazéns. [Diapositivas]. Porto Alegre. 85 diapositivas

VAN DEN BERG, Jeroen P y ZIJIM, W. Models for warehouse management: Classification and examples. En: International Journal of Production Economics. 1999. vol 59, p. 519-528.

VAN DEN BERG, Jeroen P., et al. Forward-reserve allocation in a warehouse with unit-load replenishments. En: European Journal of Operational Research, 1998, vol. 111, no 1, p. 98-113.

WALTER, Rico; BOYSE, Nils y SCHOLL, Amin. The discreet forward-reserve problem – Allocation space, selecting products, and area sizing in forward order picking. En: European Journal of Operational Research. Marzo, 2013. vol 229. no 3.

WHITE, John y FRANCIS, Richard. Normative models for some warehouse sizing problems. En: AIIE Transactions, 1971, vol. 3, no 3, 185-190.

ANEXOS

Anexo A. Cantidades a almacenar en las tres distribuciones

Distribución de pasillos verticales

1. Cantidad a almacenar de cada SKU en el área delantera.

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
1	2	31	1	61	3	91	2
2	4	32	3	62	3	92	3
3	4	33	2	63	2	93	2
4	2	34	3	64	4	94	3
5	2	35	3	65	3	95	4
6	3	36	2	66	3	96	3
7	2	37	3	67	2	97	2
8	2	38	3	68	1	98	3
9	2	39	3	69	2	99	3
10	3	40	2	70	3	100	2
11	2	41	3	71	3	101	1
12	2	42	3	72	3	102	3
13	3	43	2	73	4	103	3
14	3	44	4	74	3	104	2
15	1	45	2	75	1	105	3
16	2	46	2	76	2	106	4
17	2	47	3	77	1	107	1
18	3	48	3	78	3	108	4
19	3	49	3	79	2	109	3
20	2	50	2	80	2	110	1
21	3	51	3	81	2	111	2
22	3	52	2	82	1	112	4
23	3	53	3	83	2	113	3
24	3	54	3	84	1	114	3
25	3	55	3	85	2	115	2
26	2	56	3	86	2	116	4
27	2	57	1	87	4	117	1
28	4	58	4	88	4	118	4
29	3	59	3	89	2	119	2
30	4	60	3	90	2	120	3

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
121	3	156	2	191	3	226	2
122	2	157	1	192	4	227	4
123	3	158	2	193	4	228	3
124	4	159	4	194	1	229	3
125	1	160	3	195	3	230	1
126	4	161	2	196	3	231	3
127	3	162	3	197	3	232	4
128	1	163	4	198	2	233	3
129	2	164	2	199	3	234	4
130	4	165	2	200	2	235	2
131	3	166	2	201	2	236	2
132	3	167	4	202	1	237	3
133	2	168	1	203	1	238	2
134	4	169	3	204	3	239	3
135	1	170	2	205	2	240	2
136	4	171	3	206	4	241	3
137	2	172	2	207	4	242	2
138	3	173	3	208	3	243	4
139	2	174	3	209	3	244	2
140	2	175	3	210	3	245	2
141	1	176	2	211	2	246	2
142	3	177	1	212	2	247	3
143	4	178	3	213	3	248	2
144	3	179	4	214	4	249	2
145	2	180	2	215	2	250	3
146	3	181	3	216	1	251	2
147	3	182	3	217	1	252	2
148	3	183	2	218	3	253	2
149	1	184	3	219	2	254	3
150	2	185	2	220	1	255	3
151	3	186	1	221	3	256	1
152	3	187	2	222	3	257	2
153	2	188	2	223	2	258	4
154	3	189	2	224	3	259	4
155	2	190	2	225	1	260	2

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
261	1	296	1	331	3	366	2
262	4	297	3	332	1	367	4
263	3	298	4	333	3	368	3
264	4	299	3	334	3	369	3
265	3	300	4	335	1	370	1
266	4	301	2	336	3	371	3
267	2	302	3	337	2	372	4
268	1	303	2	338	2	373	3
269	3	304	3	339	3	374	4
270	3	305	2	340	3	375	2
271	3	306	1	341	3	376	2
272	4	307	3	342	3	377	3
273	1	308	3	343	4	378	2
274	2	309	3	344	4	379	3
275	3	310	1	345	2	380	2
276	4	311	4	346	2	381	3
277	3	312	2	347	4	382	2
278	3	313	4	348	2	383	4
279	1	314	3	349	1	384	2
280	3	315	4	350	2	385	2
281	3	316	1	351	3	386	2
282	3	317	2	352	3	387	3
283	4	318	3	353	3	388	2
284	3	319	3	354	3	389	2
285	3	320	3	355	2	390	3
286	3	321	3	356	2	391	2
287	4	322	4	357	2	392	2
288	2	323	3	358	2	393	2
289	1	324	3	359	3	394	3
290	3	325	4	360	1	395	3
291	3	326	1	361	3	396	1
292	3	327	3	362	3	397	2
293	4	328	2	363	2	398	4
294	4	329	3	364	3	399	4
295	3	330	4	365	4	400	2

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
401	2	436	2	471	2	506	3
402	1	437	3	472	3	507	3
403	4	438	3	473	3	508	3
404	3	439	3	474	2	509	3
405	1	440	3	475	3	510	3
406	3	441	3	476	3	511	1
407	2	442	3	477	3	512	2
408	2	443	1	478	3	513	3
409	2	444	3	479	2	514	2
410	1	445	3	480	3	515	1
411	2	446	3	481	3	516	3
412	2	447	2	482	1	517	3
413	4	448	2	483	1	518	1
414	2	449	3	484	2	519	3
415	2	450	2	485	3	520	3
416	3	451	3	486	3	521	3
417	2	452	3	487	4	522	4
418	2	453	3	488	2	523	3
419	2	454	2	489	2	524	3
420	2	455	3	490	2	525	2
421	2	456	3	491	2	526	3
422	3	457	3	492	2	527	1
423	1	458	4	493	4	528	4
424	2	459	3	494	2	529	1
425	3	460	3	495	1	530	4
426	4	461	1	496	2	531	1
427	2	462	3	497	3	532	3
428	2	463	2	498	1	533	3
429	2	464	1	499	4	534	4
430	3	465	3	500	3	535	3
431	3	466	2	501	3	536	2
432	2	467	2	502	2	537	2
433	2	468	2	503	2	538	2
434	2	469	2	504	3	539	3
435	4	470	3	505	2	540	3

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
541	1	576	3	611	2	646	1
542	2	577	3	612	2	647	3
543	3	578	3	613	4	648	3
544	2	579	3	614	3	649	2
545	3	580	4	615	2	650	3
546	4	581	3	616	4	651	1
547	3	582	4	617	3	652	4
548	3	583	2	618	3	653	2
549	3	584	1	619	1	654	3
550	1	585	1	620	1	655	3
551	3	586	2	621	3	656	3
552	1	587	2	622	2	657	4
553	2	588	2	623	2	658	3
554	2	589	3	624	4	659	3
555	4	590	4	625	4	660	3
556	3	591	2	626	1	661	1
557	3	592	3	627	2	662	4
558	3	593	3	628	4	663	3
559	3	594	3	629	3	664	4
560	1	595	4	630	2	665	2
561	3	596	2	631	1	666	2
562	2	597	1	632	3	667	3
563	3	598	2	633	4	668	3
564	3	599	3	634	1	669	3
565	2	600	2	635	3	670	2
566	2	601	1	636	3	671	3
567	2	602	3	637	3	672	4
568	2	603	3	638	2	673	1
569	3	604	3	639	3	674	3
570	2	605	2	640	3	675	3
571	3	606	2	641	3	676	4
572	2	607	1	642	3	677	3
573	4	608	3	643	3	678	3
574	1	609	2	644	2	679	4
575	3	610	3	645	2	680	2

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
681	3	716	3	751	2	786	3
682	1	717	3	752	3	787	2
683	3	718	4	753	3	788	2
684	3	719	3	754	3	789	2
685	1	720	3	755	2	790	3
686	2	721	3	756	3	791	2
687	3	722	4	757	2	792	4
688	3	723	3	758	1	793	1
689	3	724	2	759	3	794	3
690	1	725	3	760	3	795	2
691	2	726	2	761	2	796	2
692	2	727	3	762	2	797	3
693	1	728	3	763	3	798	3
694	2	729	2	764	3	799	1
695	2	730	2	765	4	800	3
696	3	731	3	766	2		
697	3	732	1	767	3		
698	2	733	2	768	4		
699	2	734	3	769	3		
700	3	735	3	770	3		
701	3	736	4	771	3		
702	3	737	3	772	2		
703	4	738	3	773	2		
704	3	739	2	774	1		
705	3	740	3	775	2		
706	1	741	2	776	2		
707	2	742	4	777	3		
708	1	743	3	778	3		
709	2	744	4	779	3		
710	3	745	2	780	2		
711	1	746	3	781	2		
712	1	747	2	782	3		
713	3	748	2	783	3		
714	4	749	2	784	3		
715	2	750	2	785	2		

2. Cantidad a almacenar de cada SKU en el área de reserva para la distribución de pasillos verticales.

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
1	30	31	60	61	53	91	21
2	32	32	32	62	43	92	28
3	61	33	40	63	15	93	40
4	31	34	59	64	50	94	12
5	21	35	74	65	48	95	23
6	65	36	39	66	53	96	10
7	25	37	12	67	18	97	23
8	15	38	26	68	42	98	32
9	42	39	25	69	27	99	58
10	40	40	33	70	13	100	36
11	32	41	47	71	35	101	34
12	35	42	47	72	30	102	30
13	32	43	51	73	34	103	51
14	41	44	78	74	25	104	38
15	20	45	33	75	34	105	18
16	33	46	25	76	37	106	35
17	39	47	44	77	33	107	58
18	32	48	54	78	44	108	23
19	35	49	30	79	28	109	41
20	22	50	52	80	21	110	30
21	45	51	33	81	40	111	31
22	59	52	32	82	74	112	36
23	67	53	36	83	41	113	66
24	65	54	44	84	44	114	60
25	47	55	68	85	78	115	25
26	29	56	37	86	60	116	48
27	29	57	37	87	28	117	43
28	64	58	37	88	41	118	29
29	56	59	51	89	14	119	25
30	54	60	46	90	31	120	52

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
121	46	156	16	191	30	226	29
122	49	157	13	192	76	227	57
123	60	158	49	193	54	228	32
124	79	159	42	194	18	229	34
125	19	160	25	195	65	230	16
126	52	161	19	196	50	231	39
127	53	162	49	197	41	232	66
128	25	163	56	198	33	233	47
129	31	164	37	199	55	234	59
130	42	165	35	200	34	235	31
131	29	166	36	201	31	236	39
132	46	167	56	202	13	237	28
133	44	168	21	203	23	238	22
134	62	169	50	204	43	239	52
135	20	170	42	205	29	240	21
136	48	171	34	206	71	241	22
137	46	172	21	207	52	242	30
138	38	173	49	208	33	243	69
139	27	174	44	209	49	244	34
140	23	175	59	210	22	245	44
141	13	176	16	211	27	246	21
142	38	177	18	212	21	247	38
143	62	178	42	213	54	248	46
144	45	179	45	214	74	249	29
145	25	180	34	215	18	250	23
146	62	181	39	216	18	251	22
147	32	182	65	217	19	252	38
148	42	183	23	218	42	253	46
149	18	184	64	219	23	254	54
150	19	185	15	220	20	255	43
151	46	186	27	221	56	256	20
152	33	187	37	222	35	257	19
153	21	188	37	223	38	258	63
154	49	189	33	224	32	259	70
155	51	190	28	225	17	260	60

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
261	24	296	15	331	67	366	51
262	59	297	24	332	34	367	38
263	64	298	42	333	42	368	27
264	84	299	27	334	25	369	37
265	28	300	55	335	20	370	24
266	58	301	33	336	23	371	37
267	24	302	40	337	20	372	63
268	19	303	36	338	44	373	35
269	55	304	39	339	31	374	32
270	43	305	33	340	70	375	63
271	56	306	21	341	30	376	47
272	71	307	51	342	44	377	33
273	14	308	60	343	49	378	22
274	41	309	42	344	61	379	28
275	35	310	24	345	21	380	84
276	62	311	63	346	22	381	37
277	32	312	18	347	77	382	31
278	38	313	61	348	34	383	13
279	20	314	27	349	22	384	34
280	62	315	64	350	28	385	57
281	25	316	22	351	41	386	40
282	51	317	26	352	59	387	43
283	72	318	32	353	39	388	37
284	58	319	59	354	45	389	45
285	38	320	44	355	43	390	63
286	25	321	40	356	38	391	46
287	61	322	76	357	31	392	36
288	27	323	44	358	29	393	32
289	17	324	43	359	47	394	31
290	85	325	73	360	21	395	30
291	30	326	17	361	58	396	30
292	38	327	27	362	53	397	38
293	48	328	31	363	24	398	14
294	76	329	58	364	73	399	67
295	27	330	76	365	45	400	59

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
401	32	436	22	471	41	506	39
402	15	437	51	472	33	507	36
403	62	438	23	473	30	508	59
404	55	439	25	474	33	509	33
405	16	440	27	475	38	510	60
406	57	441	59	476	70	511	20
407	17	442	41	477	48	512	30
408	22	443	14	478	63	513	40
409	21	444	30	479	26	514	36
410	18	445	36	480	48	515	20
411	30	446	41	481	63	516	40
412	21	447	29	482	9	517	47
413	60	448	34	483	21	518	13
414	31	449	49	484	24	519	40
415	23	450	28	485	46	520	52
416	51	451	39	486	34	521	32
417	39	452	30	487	45	522	40
418	25	453	59	488	41	523	69
419	46	454	21	489	19	524	51
420	23	455	53	490	35	525	34
421	41	456	41	491	28	526	49
422	32	457	37	492	19	527	25
423	17	458	63	493	42	528	53
424	42	459	57	494	44	529	27
425	57	460	37	495	24	530	77
426	48	461	14	496	29	531	18
427	30	462	44	497	39	532	29
428	18	463	22	498	23	533	25
429	35	464	26	499	64	534	55
430	42	465	35	500	56	535	44
431	59	466	32	501	32	536	22
432	45	467	38	502	34	537	24
433	28	468	20	503	42	538	24
434	36	469	23	504	54	539	51
435	42	470	46	505	27	540	40

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
541	24	576	41	611	22	646	8
542	25	577	71	612	31	647	52
543	46	578	39	613	63	648	54
544	43	579	44	614	27	649	37
545	38	580	51	615	25	650	44
546	51	581	47	616	64	651	31
547	37	582	50	617	31	652	34
548	63	583	35	618	48	653	19
549	57	584	15	619	15	654	31
550	14	585	11	620	18	655	54
551	30	586	48	621	50	656	29
552	29	587	43	622	22	657	81
553	28	588	26	623	23	658	47
554	33	589	32	624	75	659	31
555	66	590	38	625	59	660	40
556	55	591	24	626	20	661	16
557	53	592	42	627	12	662	29
558	37	593	28	628	63	663	58
559	54	594	52	629	52	664	48
560	22	595	89	630	40	665	31
561	51	596	21	631	17	666	14
562	25	597	20	632	64	667	47
563	40	598	45	633	60	668	34
564	42	599	51	634	17	669	35
565	25	600	32	635	56	670	36
566	24	601	20	636	56	671	63
567	25	602	41	637	28	672	51
568	21	603	46	638	29	673	21
569	25	604	39	639	75	674	49
570	24	605	27	640	69	675	55
571	32	606	28	641	41	676	38
572	28	607	19	642	74	677	40
573	69	608	33	643	41	678	42
574	14	609	43	644	20	679	69
575	55	610	70	645	42	680	33

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
681	65	716	53	751	45	786	59
682	20	717	33	752	48	787	30
683	51	718	60	753	37	788	38
684	52	719	45	754	40	789	32
685	29	720	54	755	38	790	35
686	25	721	33	756	23	791	33
687	44	722	63	757	37	792	50
688	23	723	31	758	24	793	25
689	27	724	28	759	35	794	33
690	8	725	55	760	31	795	22
691	35	726	25	761	30	796	29
692	27	727	34	762	34	797	42
693	16	728	28	763	24	798	27
694	33	729	31	764	37	799	14
695	40	730	25	765	29	800	48
696	59	731	37	766	30		
697	45	732	15	767	31		
698	40	733	28	768	39		
699	24	734	33	769	50		
700	47	735	56	770	49		
701	38	736	56	771	29		
702	38	737	28	772	23		
703	51	738	33	773	25		
704	46	739	27	774	24		
705	52	740	49	775	42		
706	19	741	26	776	16		
707	35	742	66	777	33		
708	18	743	65	778	68		
709	25	744	61	779	23		
710	60	745	47	780	22		
711	16	746	55	781	35		
712	17	747	27	782	57		
713	49	748	19	783	46		
714	67	749	30	784	59		
715	42	750	20	785	38		

Distribución de pasillos horizontales:

1. Cantidad a almacenar de cada SKU en el área delantera para la distribución de pasillos horizontales.

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
1	2	31	3	61	3	91	2
2	4	32	3	62	3	92	2
3	4	33	2	63	1	93	2
4	2	34	4	64	4	94	1
5	2	35	3	65	3	95	2
6	3	36	3	66	3	96	1
7	2	37	1	67	1	97	2
8	2	38	3	68	3	98	2
9	2	39	2	69	3	99	4
10	3	40	3	70	1	100	4
11	2	41	3	71	2	101	2
12	2	42	2	72	2	102	2
13	3	43	3	73	3	103	3
14	3	44	3	74	3	104	3
15	1	45	3	75	2	105	1
16	2	46	2	76	4	106	2
17	2	47	3	77	3	107	3
18	3	48	3	78	3	108	1
19	3	49	2	79	2	109	2
20	2	50	4	80	1	110	3
21	3	51	2	81	2	111	2
22	3	52	2	82	3	112	3
23	3	53	3	83	3	113	4
24	3	54	3	84	3	114	3
25	3	55	3	85	4	115	2
26	2	56	2	86	3	116	3
27	2	57	3	87	1	117	3
28	4	58	2	88	2	118	2
29	3	59	3	89	1	119	1
30	4	60	3	90	3	120	3

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
121	3	156	2	191	3	226	2
122	2	157	1	192	4	227	4
123	3	158	2	193	4	228	3
124	4	159	4	194	1	229	3
125	1	160	3	195	3	230	1
126	4	161	2	196	3	231	3
127	3	162	3	197	3	232	4
128	1	163	4	198	2	233	3
129	2	164	2	199	3	234	4
130	4	165	2	200	2	235	2
131	3	166	2	201	2	236	2
132	3	167	4	202	1	237	3
133	2	168	1	203	1	238	2
134	4	169	3	204	3	239	3
135	1	170	2	205	2	240	2
136	4	171	3	206	4	241	3
137	2	172	2	207	4	242	2
138	3	173	3	208	3	243	4
139	2	174	3	209	3	244	2
140	2	175	3	210	3	245	2
141	1	176	2	211	2	246	2
142	3	177	1	212	2	247	3
143	4	178	3	213	3	248	2
144	3	179	4	214	4	249	2
145	2	180	2	215	2	250	3
146	3	181	3	216	1	251	2
147	3	182	3	217	1	252	2
148	3	183	2	218	3	253	2
149	1	184	3	219	2	254	3
150	2	185	2	220	1	255	3
151	3	186	1	221	3	256	1
152	3	187	2	222	3	257	2
153	2	188	2	223	2	258	4
154	3	189	2	224	3	259	4
155	2	190	2	225	1	260	2

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
261	1	296	1	331	3	366	2
262	4	297	3	332	1	367	3
263	3	298	4	333	3	368	2
264	4	299	3	334	3	369	3
265	3	300	4	335	1	370	2
266	4	301	2	336	3	371	3
267	2	302	3	337	2	372	3
268	1	303	2	338	2	373	4
269	3	304	3	339	3	374	2
270	3	305	2	340	3	375	3
271	3	306	1	341	3	376	3
272	4	307	3	342	3	377	3
273	1	308	3	343	4	378	1
274	2	309	3	344	4	379	3
275	3	310	1	345	2	380	4
276	4	311	4	346	2	381	4
277	3	312	2	347	4	382	3
278	3	313	4	348	2	383	1
279	1	314	3	349	1	384	3
280	3	315	4	350	2	385	3
281	3	316	1	351	3	386	3
282	3	317	2	352	3	387	3
283	4	318	3	353	3	388	2
284	3	319	3	354	3	389	3
285	3	320	3	355	2	390	3
286	3	321	3	356	2	391	2
287	4	322	4	357	2	392	2
288	2	323	3	358	2	393	1
289	1	324	3	359	3	394	2
290	3	325	4	360	1	395	2
291	3	326	1	361	3	396	2
292	3	327	3	362	3	397	2
293	4	328	2	363	2	398	1
294	4	329	3	364	3	399	4
295	3	330	4	365	4	400	4

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
401	2	436	2	471	2	506	3
402	1	437	3	472	3	507	3
403	4	438	3	473	3	508	3
404	3	439	3	474	2	509	3
405	1	440	3	475	3	510	3
406	3	441	3	476	3	511	1
407	2	442	3	477	3	512	2
408	2	443	1	478	3	513	3
409	2	444	3	479	2	514	2
410	1	445	3	480	3	515	1
411	2	446	3	481	3	516	3
412	2	447	2	482	1	517	3
413	4	448	2	483	1	518	1
414	2	449	3	484	2	519	3
415	2	450	2	485	3	520	3
416	3	451	3	486	3	521	3
417	2	452	3	487	4	522	4
418	2	453	3	488	2	523	3
419	2	454	2	489	2	524	3
420	2	455	3	490	2	525	2
421	2	456	3	491	2	526	3
422	3	457	3	492	2	527	1
423	1	458	4	493	4	528	4
424	2	459	3	494	2	529	1
425	3	460	3	495	1	530	4
426	3	461	1	496	2	531	1
427	2	462	3	497	3	532	3
428	2	463	2	498	1	533	3
429	2	464	1	499	4	534	4
430	3	465	3	500	3	535	3
431	3	466	2	501	3	536	2
432	2	467	2	502	2	537	2
433	2	468	2	503	2	538	2
434	2	469	2	504	3	539	3
435	4	470	3	505	2	540	3

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
541	1	576	3	611	2	646	1
542	2	577	3	612	2	647	3
543	3	578	3	613	4	648	3
544	2	579	3	614	3	649	2
545	3	580	4	615	2	650	3
546	4	581	3	616	4	651	1
547	3	582	4	617	3	652	4
548	3	583	2	618	3	653	2
549	3	584	1	619	1	654	3
550	1	585	1	620	1	655	3
551	3	586	2	621	3	656	3
552	1	587	2	622	2	657	4
553	2	588	2	623	2	658	3
554	2	589	3	624	4	659	3
555	4	590	4	625	4	660	3
556	3	591	2	626	1	661	1
557	3	592	3	627	2	662	4
558	3	593	3	628	4	663	3
559	3	594	3	629	3	664	4
560	1	595	4	630	2	665	2
561	3	596	2	631	1	666	2
562	2	597	1	632	3	667	3
563	3	598	2	633	4	668	3
564	3	599	3	634	1	669	3
565	2	600	2	635	3	670	2
566	2	601	1	636	3	671	3
567	2	602	3	637	3	672	4
568	2	603	3	638	2	673	1
569	3	604	3	639	3	674	3
570	2	605	2	640	3	675	3
571	3	606	2	641	3	676	4
572	2	607	1	642	3	677	3
573	4	608	3	643	3	678	3
574	1	609	2	644	2	679	4
575	3	610	3	645	2	680	2

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
681	3	716	3	751	2	786	3
682	1	717	3	752	3	787	2
683	3	718	4	753	3	788	2
684	3	719	3	754	3	789	2
685	1	720	3	755	2	790	3
686	2	721	3	756	3	791	2
687	3	722	4	757	2	792	4
688	3	723	3	758	1	793	1
689	3	724	2	759	3	794	3
690	1	725	3	760	3	795	2
691	2	726	2	761	2	796	2
692	2	727	3	762	2	797	3
693	1	728	3	763	3	798	3
694	2	729	2	764	3	799	1
695	2	730	2	765	4	800	3
696	3	731	3	766	2		
697	3	732	1	767	3		
698	2	733	2	768	4		
699	2	734	3	769	3		
700	3	735	3	770	3		
701	3	736	4	771	3		
702	3	737	3	772	2		
703	4	738	3	773	2		
704	3	739	2	774	1		
705	3	740	3	775	2		
706	1	741	2	776	2		
707	2	742	4	777	3		
708	1	743	3	778	3		
709	2	744	4	779	3		
710	3	745	2	780	2		
711	1	746	3	781	2		
712	1	747	2	782	3		
713	3	748	2	783	3		
714	4	749	2	784	3		
715	2	750	2	785	2		

2. Cantidad a almacenar de cada SKU en el área de reserva para la distribución de pasillos horizontales.

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
1	30	31	60	61	52	91	21
2	32	32	32	62	43	92	28
3	61	33	40	63	15	93	40
4	31	34	59	64	49	94	12
5	21	35	73	65	47	95	23
6	64	36	39	66	53	96	10
7	25	37	12	67	18	97	22
8	15	38	26	68	42	98	32
9	42	39	25	69	27	99	58
10	39	40	33	70	13	100	36
11	32	41	47	71	35	101	34
12	35	42	47	72	30	102	30
13	32	43	51	73	34	103	50
14	40	44	78	74	25	104	38
15	20	45	33	75	34	105	18
16	33	46	25	76	37	106	35
17	38	47	44	77	33	107	57
18	32	48	54	78	43	108	23
19	35	49	30	79	28	109	40
20	22	50	52	80	21	110	30
21	45	51	33	81	40	111	31
22	58	52	32	82	73	112	35
23	67	53	36	83	41	113	65
24	65	54	44	84	44	114	60
25	46	55	68	85	78	115	25
26	29	56	37	86	59	116	48
27	29	57	37	87	28	117	43
28	63	58	37	88	41	118	29
29	56	59	51	89	14	119	25
30	53	60	46	90	31	120	52

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
121	46	156	16	191	30	226	29
122	49	157	13	192	75	227	56
123	60	158	48	193	53	228	32
124	79	159	42	194	18	229	34
125	18	160	25	195	65	230	16
126	51	161	19	196	50	231	39
127	53	162	49	197	41	232	66
128	25	163	55	198	33	233	47
129	30	164	37	199	55	234	59
130	42	165	35	200	34	235	31
131	29	166	36	201	31	236	39
132	46	167	56	202	13	237	28
133	43	168	21	203	23	238	22
134	62	169	50	204	43	239	52
135	20	170	42	205	29	240	21
136	48	171	33	206	71	241	22
137	45	172	21	207	52	242	30
138	37	173	49	208	33	243	69
139	27	174	44	209	49	244	34
140	23	175	59	210	22	245	44
141	13	176	16	211	27	246	21
142	37	177	18	212	21	247	38
143	62	178	42	213	54	248	45
144	45	179	45	214	73	249	29
145	25	180	34	215	18	250	23
146	61	181	38	216	18	251	22
147	32	182	65	217	19	252	38
148	42	183	23	218	42	253	46
149	17	184	64	219	23	254	54
150	18	185	15	220	20	255	43
151	46	186	27	221	56	256	20
152	33	187	37	222	35	257	19
153	21	188	37	223	38	258	62
154	49	189	33	224	32	259	70
155	51	190	28	225	17	260	59

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
261	24	296	15	331	67	366	51
262	59	297	24	332	34	367	38
263	64	298	42	333	42	368	27
264	84	299	26	334	25	369	37
265	28	300	54	335	20	370	24
266	57	301	33	336	23	371	36
267	24	302	40	337	20	372	63
268	19	303	36	338	44	373	34
269	55	304	39	339	31	374	32
270	43	305	33	340	70	375	63
271	55	306	21	341	30	376	47
272	71	307	51	342	43	377	33
273	13	308	60	343	48	378	21
274	41	309	42	344	60	379	28
275	35	310	24	345	21	380	84
276	62	311	63	346	22	381	37
277	32	312	18	347	77	382	31
278	38	313	61	348	34	383	13
279	20	314	27	349	22	384	34
280	61	315	64	350	28	385	57
281	25	316	22	351	40	386	40
282	51	317	26	352	59	387	43
283	72	318	32	353	39	388	37
284	58	319	59	354	45	389	45
285	38	320	44	355	43	390	63
286	25	321	40	356	38	391	46
287	61	322	76	357	31	392	36
288	27	323	44	358	29	393	32
289	17	324	42	359	47	394	31
290	85	325	72	360	21	395	30
291	30	326	17	361	58	396	30
292	38	327	27	362	53	397	38
293	48	328	31	363	24	398	14
294	75	329	57	364	73	399	67
295	27	330	75	365	45	400	59

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
401	31	436	22	471	41	506	39
402	15	437	51	472	33	507	36
403	62	438	23	473	30	508	59
404	55	439	25	474	33	509	33
405	16	440	27	475	38	510	60
406	57	441	58	476	70	511	20
407	17	442	41	477	48	512	30
408	22	443	14	478	63	513	39
409	21	444	29	479	26	514	36
410	18	445	36	480	48	515	20
411	30	446	40	481	62	516	40
412	21	447	29	482	9	517	46
413	60	448	34	483	21	518	13
414	31	449	49	484	24	519	40
415	23	450	28	485	46	520	51
416	51	451	39	486	34	521	32
417	39	452	30	487	44	522	40
418	25	453	59	488	41	523	69
419	46	454	21	489	19	524	51
420	23	455	53	490	34	525	33
421	41	456	41	491	28	526	48
422	32	457	37	492	19	527	25
423	17	458	63	493	42	528	52
424	42	459	57	494	44	529	27
425	57	460	37	495	24	530	77
426	48	461	14	496	29	531	18
427	30	462	44	497	39	532	29
428	18	463	22	498	23	533	25
429	35	464	26	499	64	534	55
430	42	465	35	500	56	535	44
431	59	466	32	501	32	536	22
432	45	467	37	502	34	537	24
433	27	468	20	503	42	538	23
434	36	469	23	504	54	539	51
435	42	470	46	505	27	540	40

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
541	24	576	41	611	22	646	8
542	25	577	71	612	30	647	52
543	46	578	38	613	63	648	54
544	43	579	44	614	26	649	37
545	38	580	51	615	25	650	44
546	51	581	47	616	64	651	30
547	37	582	50	617	31	652	34
548	63	583	35	618	47	653	19
549	57	584	15	619	15	654	31
550	14	585	11	620	18	655	54
551	30	586	48	621	49	656	29
552	29	587	43	622	22	657	80
553	28	588	26	623	22	658	47
554	33	589	32	624	75	659	31
555	66	590	38	625	59	660	40
556	55	591	24	626	20	661	16
557	53	592	42	627	12	662	29
558	37	593	28	628	63	663	58
559	54	594	52	629	52	664	47
560	22	595	88	630	40	665	31
561	51	596	21	631	17	666	14
562	25	597	20	632	64	667	47
563	40	598	44	633	60	668	34
564	41	599	51	634	17	669	35
565	25	600	32	635	56	670	35
566	24	601	20	636	56	671	63
567	25	602	41	637	28	672	50
568	20	603	46	638	29	673	21
569	25	604	39	639	75	674	49
570	24	605	27	640	69	675	55
571	32	606	28	641	41	676	38
572	27	607	19	642	74	677	40
573	69	608	33	643	41	678	42
574	14	609	43	644	20	679	69
575	55	610	69	645	42	680	33

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
681	65	716	53	751	44	786	59
682	20	717	33	752	48	787	30
683	50	718	60	753	37	788	38
684	52	719	45	754	40	789	32
685	28	720	54	755	38	790	35
686	25	721	33	756	23	791	33
687	43	722	63	757	36	792	50
688	23	723	31	758	24	793	25
689	27	724	28	759	35	794	33
690	8	725	55	760	31	795	22
691	35	726	25	761	30	796	29
692	27	727	34	762	34	797	42
693	16	728	28	763	24	798	27
694	33	729	31	764	37	799	14
695	40	730	25	765	29	800	48
696	59	731	37	766	29		
697	45	732	15	767	31		
698	40	733	28	768	39		
699	24	734	33	769	50		
700	47	735	55	770	48		
701	38	736	55	771	29		
702	38	737	28	772	23		
703	51	738	32	773	25		
704	46	739	27	774	24		
705	52	740	48	775	42		
706	19	741	26	776	16		
707	35	742	66	777	33		
708	18	743	65	778	68		
709	25	744	61	779	23		
710	60	745	47	780	22		
711	16	746	55	781	35		
712	17	747	27	782	57		
713	49	748	19	783	45		
714	67	749	29	784	59		
715	42	750	19	785	38		

Distribución con área central:

1. Cantidad a almacenar de cada SKU en el área delantera para la distribución con área central.

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
1	3	31	3	61	4	91	2
2	4	32	3	62	4	92	3
3	4	33	2	63	1	93	3
4	2	34	4	64	4	94	1
5	2	35	4	65	3	95	2
6	4	36	3	66	4	96	1
7	3	37	1	67	2	97	2
8	2	38	3	68	3	98	3
9	3	39	2	69	3	99	4
10	3	40	3	70	1	100	4
11	2	41	3	71	2	101	2
12	3	42	3	72	2	102	2
13	4	43	3	73	3	103	3
14	4	44	4	74	3	104	3
15	1	45	4	75	3	105	1
16	3	46	2	76	4	106	3
17	2	47	3	77	4	107	4
18	4	48	4	78	3	108	2
19	4	49	2	79	2	109	3
20	3	50	4	80	1	110	3
21	4	51	3	81	3	111	3
22	4	52	2	82	4	112	4
23	4	53	3	83	4	113	4
24	4	54	4	84	4	114	4
25	3	55	3	85	4	115	3
26	3	56	3	86	4	116	3
27	3	57	3	87	2	117	4
28	4	58	2	88	3	118	2
29	4	59	3	89	1	119	1
30	4	60	3	90	3	120	4

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
121	3	156	2	191	4	226	2
122	3	157	2	192	4	227	4
123	4	158	3	193	4	228	3
124	4	159	4	194	2	229	3
125	1	160	3	195	4	230	1
126	4	161	2	196	3	231	3
127	3	162	3	197	3	232	4
128	2	163	4	198	2	233	3
129	3	164	2	199	4	234	4
130	4	165	3	200	3	235	3
131	3	166	2	201	3	236	3
132	3	167	4	202	1	237	3
133	3	168	1	203	1	238	2
134	4	169	4	204	4	239	4
135	1	170	2	205	2	240	2
136	4	171	4	206	4	241	3
137	3	172	2	207	4	242	2
138	4	173	4	208	4	243	4
139	2	174	4	209	4	244	2
140	2	175	4	210	3	245	3
141	1	176	2	211	2	246	2
142	4	177	1	212	2	247	4
143	4	178	4	213	4	248	3
144	4	179	4	214	4	249	2
145	2	180	2	215	2	250	4
146	4	181	4	216	1	251	2
147	4	182	4	217	1	252	3
148	4	183	2	218	4	253	3
149	1	184	3	219	2	254	4
150	2	185	2	220	2	255	3
151	4	186	2	221	4	256	2
152	3	187	2	222	4	257	3
153	2	188	2	223	3	258	4
154	3	189	3	224	3	259	4
155	3	190	2	225	2	260	3

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
261	2	296	1	331	3	366	3
262	4	297	4	332	2	367	3
263	4	298	4	333	3	368	2
264	4	299	4	334	4	369	3
265	3	300	4	335	1	370	2
266	4	301	3	336	4	371	3
267	3	302	4	337	2	372	4
268	2	303	3	338	2	373	4
269	4	304	3	339	3	374	2
270	4	305	3	340	4	375	3
271	3	306	2	341	3	376	4
272	4	307	3	342	3	377	3
273	1	308	4	343	4	378	2
274	3	309	3	344	4	379	3
275	3	310	2	345	2	380	4
276	4	311	4	346	2	381	4
277	3	312	2	347	4	382	4
278	4	313	4	348	2	383	1
279	2	314	3	349	1	384	4
280	3	315	4	350	3	385	3
281	4	316	2	351	3	386	3
282	4	317	3	352	4	387	4
283	4	318	4	353	3	388	2
284	4	319	3	354	3	389	4
285	3	320	3	355	3	390	4
286	3	321	4	356	3	391	3
287	4	322	4	357	2	392	3
288	3	323	3	358	3	393	2
289	1	324	3	359	3	394	2
290	4	325	4	360	2	395	3
291	3	326	1	361	4	396	2
292	3	327	3	362	4	397	2
293	4	328	2	363	3	398	2
294	4	329	4	364	4	399	4
295	4	330	4	365	4	400	4

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
401	3	436	2	471	2	506	4
402	1	437	4	472	4	507	3
403	4	438	3	473	3	508	4
404	4	439	3	474	2	509	4
405	1	440	3	475	3	510	4
406	4	441	4	476	3	511	1
407	2	442	3	477	3	512	3
408	2	443	1	478	4	513	4
409	3	444	3	479	2	514	3
410	2	445	3	480	3	515	1
411	3	446	4	481	3	516	3
412	2	447	2	482	1	517	3
413	4	448	3	483	1	518	1
414	3	449	4	484	3	519	3
415	3	450	2	485	4	520	3
416	4	451	4	486	4	521	4
417	2	452	4	487	4	522	4
418	2	453	4	488	2	523	4
419	3	454	2	489	3	524	4
420	3	455	4	490	2	525	2
421	3	456	4	491	2	526	4
422	4	457	3	492	2	527	2
423	1	458	4	493	4	528	4
424	3	459	4	494	3	529	2
425	4	460	4	495	2	530	4
426	4	461	1	496	2	531	2
427	2	462	3	497	4	532	4
428	3	463	2	498	2	533	3
429	3	464	2	499	4	534	4
430	4	465	4	500	4	535	4
431	3	466	2	501	3	536	2
432	3	467	2	502	3	537	3
433	2	468	2	503	3	538	3
434	3	469	3	504	4	539	4
435	4	470	4	505	2	540	4

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
541	1	576	4	611	2	646	1
542	2	577	4	612	2	647	4
543	4	578	3	613	4	648	4
544	3	579	4	614	3	649	3
545	3	580	4	615	3	650	3
546	4	581	4	616	4	651	2
547	4	582	4	617	4	652	4
548	4	583	2	618	4	653	2
549	3	584	1	619	1	654	3
550	1	585	2	620	1	655	4
551	3	586	3	621	4	656	4
552	2	587	3	622	2	657	4
553	3	588	2	623	3	658	3
554	3	589	4	624	4	659	4
555	4	590	4	625	4	660	3
556	3	591	2	626	1	661	1
557	4	592	3	627	2	662	4
558	3	593	4	628	4	663	4
559	4	594	4	629	4	664	4
560	2	595	4	630	2	665	3
561	4	596	2	631	1	666	2
562	2	597	2	632	4	667	4
563	3	598	3	633	4	668	4
564	3	599	4	634	1	669	3
565	2	600	2	635	3	670	2
566	2	601	2	636	4	671	4
567	2	602	3	637	3	672	4
568	2	603	4	638	2	673	2
569	3	604	3	639	4	674	4
570	2	605	2	640	4	675	4
571	3	606	2	641	3	676	4
572	2	607	2	642	4	677	3
573	4	608	3	643	3	678	3
574	1	609	3	644	2	679	4
575	4	610	4	645	3	680	2

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
681	4	716	3	751	3	786	3
682	1	717	3	752	3	787	3
683	4	718	4	753	3	788	3
684	4	719	3	754	3	789	3
685	2	720	3	755	3	790	4
686	2	721	4	756	3	791	3
687	4	722	4	757	2	792	4
688	3	723	3	758	2	793	2
689	3	724	2	759	3	794	4
690	1	725	4	760	4	795	2
691	3	726	2	761	2	796	2
692	3	727	3	762	2	797	4
693	1	728	3	763	3	798	3
694	2	729	2	764	4	799	2
695	3	730	3	765	4	800	3
696	4	731	4	766	3		
697	4	732	1	767	4		
698	3	733	3	768	4		
699	2	734	4	769	4		
700	4	735	4	770	4		
701	4	736	4	771	3		
702	4	737	4	772	2		
703	4	738	4	773	2		
704	4	739	2	774	1		
705	3	740	3	775	3		
706	2	741	3	776	2		
707	2	742	4	777	3		
708	1	743	3	778	4		
709	2	744	4	779	3		
710	4	745	3	780	3		
711	2	746	4	781	3		
712	1	747	2	782	4		
713	4	748	2	783	4		
714	4	749	3	784	4		
715	3	750	3	785	3		

2. Cantidad a almacenar de cada SKU en el área de reserva para la distribución con área central.

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
1	30	31	60	61	52	91	21
2	32	32	32	62	43	92	28
3	61	33	40	63	15	93	40
4	31	34	59	64	49	94	12
5	21	35	73	65	47	95	23
6	64	36	39	66	53	96	10
7	25	37	12	67	18	97	22
8	15	38	26	68	42	98	32
9	42	39	25	69	27	99	58
10	39	40	33	70	13	100	36
11	32	41	47	71	35	101	34
12	35	42	47	72	30	102	30
13	32	43	51	73	34	103	50
14	41	44	78	74	25	104	38
15	20	45	33	75	34	105	18
16	33	46	25	76	37	106	35
17	39	47	44	77	33	107	58
18	32	48	54	78	44	108	23
19	35	49	30	79	28	109	40
20	22	50	52	80	21	110	30
21	45	51	33	81	40	111	31
22	58	52	32	82	73	112	36
23	67	53	36	83	41	113	65
24	65	54	44	84	44	114	60
25	47	55	68	85	78	115	25
26	29	56	37	86	59	116	48
27	29	57	37	87	28	117	43
28	64	58	37	88	41	118	29
29	56	59	51	89	14	119	25
30	53	60	46	90	31	120	52

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
121	46	156	16	191	30	226	29
122	49	157	13	192	75	227	56
123	60	158	49	193	54	228	32
124	79	159	42	194	18	229	34
125	18	160	25	195	65	230	16
126	52	161	19	196	50	231	39
127	53	162	49	197	41	232	66
128	25	163	56	198	33	233	47
129	31	164	37	199	55	234	59
130	42	165	35	200	34	235	31
131	29	166	36	201	31	236	39
132	46	167	56	202	13	237	28
133	44	168	21	203	23	238	22
134	62	169	50	204	43	239	52
135	20	170	42	205	29	240	21
136	48	171	33	206	71	241	22
137	46	172	21	207	52	242	30
138	37	173	49	208	33	243	69
139	27	174	44	209	49	244	34
140	23	175	59	210	22	245	44
141	13	176	16	211	27	246	21
142	37	177	18	212	21	247	38
143	62	178	42	213	54	248	46
144	45	179	45	214	74	249	29
145	25	180	34	215	18	250	23
146	61	181	39	216	18	251	22
147	32	182	65	217	19	252	38
148	42	183	23	218	42	253	46
149	18	184	64	219	23	254	54
150	18	185	15	220	20	255	43
151	46	186	27	221	56	256	20
152	33	187	37	222	35	257	19
153	21	188	37	223	38	258	62
154	49	189	33	224	32	259	70
155	51	190	28	225	17	260	60

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
261	24	296	15	331	67	366	30
262	59	297	24	332	34	367	38
263	64	298	42	333	42	368	14
264	84	299	27	334	25	369	67
265	28	300	54	335	20	370	59
266	58	301	33	336	23	371	32
267	24	302	40	337	20	372	15
268	19	303	36	338	44	373	62
269	55	304	39	339	31	374	55
270	43	305	33	340	70	375	16
271	56	306	21	341	30	376	57
272	71	307	51	342	43	377	17
273	13	308	60	343	48	378	22
274	41	309	42	344	60	379	21
275	35	310	24	345	21	380	18
276	62	311	63	346	22	381	30
277	32	312	18	347	77	382	21
278	38	313	61	348	34	383	60
279	20	314	27	349	22	384	31
280	62	315	64	350	28	385	23
281	25	316	22	351	41	386	51
282	51	317	26	352	59	387	39
283	72	318	32	353	39	388	25
284	58	319	59	354	45	389	46
285	38	320	44	355	43	390	23
286	25	321	40	356	38	391	41
287	61	322	76	357	31	392	32
288	27	323	44	358	29	393	17
289	17	324	42	359	47	394	42
290	85	325	72	360	21	395	57
291	30	326	17	361	58	396	48
292	38	327	27	362	53	397	30
293	48	328	31	363	24	398	18
294	76	329	57	364	73	399	35
295	27	330	75	365	45	400	42

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
401	32	436	22	471	41	506	39
402	15	437	51	472	33	507	36
403	62	438	23	473	30	508	59
404	55	439	25	474	33	509	33
405	16	440	27	475	38	510	60
406	57	441	59	476	70	511	20
407	17	442	41	477	48	512	30
408	22	443	14	478	63	513	39
409	21	444	30	479	26	514	36
410	18	445	36	480	48	515	20
411	30	446	41	481	62	516	40
412	21	447	29	482	9	517	47
413	60	448	34	483	21	518	13
414	31	449	49	484	24	519	40
415	23	450	28	485	46	520	52
416	51	451	39	486	34	521	32
417	39	452	30	487	44	522	40
418	25	453	59	488	41	523	69
419	46	454	21	489	19	524	51
420	23	455	53	490	34	525	33
421	41	456	41	491	28	526	48
422	32	457	37	492	19	527	25
423	17	458	63	493	42	528	53
424	42	459	57	494	44	529	27
425	57	460	37	495	24	530	77
426	48	461	14	496	29	531	18
427	30	462	44	497	39	532	29
428	18	463	22	498	23	533	25
429	35	464	26	499	64	534	55
430	42	465	35	500	56	535	44
431	59	466	32	501	32	536	22
432	45	467	37	502	34	537	24
433	27	468	20	503	42	538	24
434	36	469	23	504	54	539	51
435	42	470	46	505	27	540	40

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
541	24	576	41	611	22	646	8
542	25	577	71	612	31	647	52
543	46	578	38	613	63	648	54
544	43	579	44	614	26	649	37
545	38	580	51	615	25	650	44
546	51	581	47	616	64	651	30
547	37	582	50	617	31	652	34
548	63	583	35	618	47	653	19
549	57	584	15	619	15	654	31
550	14	585	11	620	18	655	54
551	30	586	48	621	49	656	29
552	29	587	43	622	22	657	81
553	28	588	26	623	23	658	47
554	33	589	32	624	75	659	31
555	66	590	38	625	59	660	40
556	55	591	24	626	20	661	16
557	53	592	42	627	12	662	29
558	37	593	28	628	63	663	58
559	54	594	52	629	52	664	48
560	22	595	88	630	40	665	31
561	51	596	21	631	17	666	14
562	25	597	20	632	64	667	47
563	40	598	45	633	60	668	34
564	42	599	51	634	17	669	35
565	25	600	32	635	56	670	36
566	24	601	20	636	56	671	63
567	25	602	41	637	28	672	51
568	21	603	46	638	29	673	21
569	25	604	39	639	75	674	49
570	24	605	27	640	69	675	55
571	32	606	28	641	41	676	38
572	28	607	19	642	74	677	40
573	69	608	33	643	41	678	42
574	14	609	43	644	20	679	69
575	55	610	70	645	42	680	33

Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar	Tipo de SKU	Cantidad a almacenar
681	65	716	53	751	44	786	59
682	20	717	33	752	48	787	30
683	51	718	60	753	37	788	38
684	52	719	45	754	40	789	32
685	28	720	54	755	38	790	35
686	25	721	33	756	23	791	33
687	43	722	63	757	36	792	50
688	23	723	31	758	24	793	25
689	27	724	28	759	35	794	33
690	8	725	55	760	31	795	22
691	35	726	25	761	30	796	29
692	27	727	34	762	34	797	42
693	16	728	28	763	24	798	27
694	33	729	31	764	37	799	14
695	40	730	25	765	29	800	48
696	59	731	37	766	30		
697	45	732	15	767	31		
698	40	733	28	768	39		
699	24	734	33	769	50		
700	47	735	56	770	49		
701	38	736	56	771	29		
702	38	737	28	772	23		
703	51	738	32	773	25		
704	46	739	27	774	24		
705	52	740	49	775	42		
706	19	741	26	776	16		
707	35	742	66	777	33		
708	18	743	65	778	68		
709	25	744	61	779	23		
710	60	745	47	780	22		
711	16	746	55	781	35		
712	17	747	27	782	57		
713	49	748	19	783	45		
714	67	749	30	784	59		
715	42	750	20	785	38		

Anexo B. Código de programación en GAMSIDE

1. Distribución de pasillos verticales

\$ title Modelo de pasillos verticales

set

i Tipo de SKU /1*800/;

Parameters

Ab Suma del ancho de los pasillos y dos veces la profundidad del pallet rack /20/

Af Suma del ancho de los pasillos y dos veces la profundidad(ancho) del estante /8/

As Profundidad de un estante /4/

Ap profundidad de un pallet /4/

Ca1 Costo de construccion por unidad de area del area delantera /30/

Ca2 Costo de construccion por unidad de area del area de reserva /25/

Cw Costo de construccion por unidad de longitud de los muros externos /1000/

Co Costo de alistamiento por unidad de distancia viajada /0.0068/

Cp Costo de guardar por unidad de distancia viajada /0.0024/

Cr Costo de reaprovisionamiento por unidad de distancia viajada /0.0028/

Np Numero de paradas (picks) por viaje de alistamiento /80/

Nr Numero promedio de viajes de alistamiento al año /180/

Vp Numero neto de productos almacenados por pallet /64/

Bb Factor de utilizacion del espacio en el area de reserva /5.38/

Bf Factor de utilizacion del espacio en el area delantera /1.75/

K Valor presente neto del factor de descuento /4.191/

We Pasillo central /0/;

parameter

Ci(i) Costo de mantenimiento de inventarios del SKU i

$A_i(i)$ Costo fijo por ordenar reaprovisionamiento externo del SKU i

$D_i(i)$ Demanda del SKU i

$S_i(i)$ Inventario de seguridad del SKU i ;

option seed =0;

loop(i , $C_i(i)=\text{uniform}(0.3,6.5)$)

loop(i , $A_i(i)=\text{uniform}(20,100)$)

loop(i , $D_i(i)=\text{uniform}(10,200)$)

loop(i , $S_i(i)=\text{uniform}(5,60)$);

Variables

Y_l Numero de pasillos en el area delantera

Y_{w1} Numero de estantes por pasillo en el area delantera

Y_{w2} Numero de lugares para pallet en el area trasera

$Q(i)$ Cantidad a pedir del SKU i en unidades de volumen

$Ca(i)$ Cantidad a almacenar en el area delantera del SKU i

Z Costo

R Manipulacion

N Inventarios

C_n Construccion;

Positive variables $Q, Ca, Y_l, Y_{w1}, Y_{w2}, R$;

$Y_l.lo = 1$;

$Q.lo(i) = 0.01$;

$Ca.lo(i) = 0.01$;

equations

Costo Costo total

Capr Capacidad del area de reserva

Capd Capacidad del area delantera;

Costo.. $Z=e= (Ca1*Yl*Af*Yw1*As + Ca2*Yl*Af*Yw2*Ap + 2*Cw*(Yw1*As + Yw2*Ap + Yl*Af)) + K*[\sum(i,Cr*Di(i)*(2*Yl*Af/3 + Yw1*As + Yw2*Ap)/Ca(i))+ \sum (i,Cp*Di(i)*(Yl*Af/2 + Yw2*Ap)/Vp)+ Nr*Co*(2*Yl*Af*(Np-1)/(Np+1) + Yw1*As*Yl*(1-((Yl-1)/Yl)**Np)+ 0.5*Yw1*As)] + K*[\sum(i,Ai(i)*Di(i)/Q(i))+ \sum (i,Ci(i)*(Q(i)/2 + Si(i)))];$

Capr.. $\sum (i,Q(i)+Si(i)) =L= Yw2*Ap*Yl*Af*Bb;$

Capd.. $\sum (i,Ca(i)) =L= Yw1*As*Yl*Af*Bf;$

model prueba /all/;

solve prueba using nlp minimizing Z;

Execute_unload 'results.gdx' Q

Execute 'gdxrw.exe results.gdx var= Q ';

2. Distribución de pasillos horizontales

\$ Title Modelo 2

set

i Tipo de SKU /1*800/;

Parameters

Ab Suma del ancho de los pasillos y dos veces la profundidad del pallet rack /20/

Af Suma del ancho de los pasillos y dos veces la profundidad(ancho) del estante /8/

As Profundidad de un estante /4/

Ap profundidad de un pallet /4/

Ca1 Costo de construccion por unidad de area del area delantera /30/

Ca2 Costo de construccion por unidad de area del area de reserva /25/

Cw Costo de construccion por unidad de longitud de los muros externos /1000/

Co Costo de alistamiento por unidad de distancia viajada /0.0068/

Cp Costo de guardar por unidad de distancia viajada /0.0024/

Cr Costo de reaprovisionamiento por unidad de distancia viajada /0.0028/
Np Numero de paradas (picks) por viaje de alistamiento /80/
Nr Numero promedio de viajes de alistamiento al año /180/
Vp Numero neto de productos almacenados por pallet /64/
Bb Factor de utilizacion del espacio en el area de reserva /5.38/
Bf Factor de utilizacion del espacio en el area delantera /1.75/
K Valor presente neto del factor de descuento /4.191/
We Ancho del pasillo central /5/;

parameter

Ci(i) Costo de mantenimiento de inventarios del SKU i
Ai(i) Costo fijo por ordenar reaprovisionamiento externo del SKU i
Di(i) Demanda del SKU i
Si(i) Inventario de seguridad del SKU i ;
option seed =0;
loop(i, Ci(i)=uniform(0.3,6.5))
loop(i, Ai(i)=uniform(20,100))
loop(i, Di(i)=uniform(10,200))
loop(i, Si(i)=uniform(5,60));

Variables

Y1 Numero de pasillos es el area delantera
Yw1 Numero de estantes por pasillo en el area delantera
Y2 Numero de pasillos del area de reserva
Q(i) Cantidad a pedir del SKUi en unidades de volumen
Ca(i) Cantidad a almacenar en el area delantera del SKU i
Z Costo
R Manipulacion
N Inventarios

Cn Construccion;

Positive variables Q, Ca, Yl, Yw1, Yw2, Y2;

Yl.lo = 1;

Q.lo(i) = 0.01;

Ca.lo(i) = 0.01;

equations

Costo Costo total

Capr Capacidad del area de reserva

Capd Capacidad del area delantera;

Costo.. Z=e= Ca1*Yl*Af*(Yw1*As+We)+ Ca2*Y2*Ab*(Yw1*As+We) + 2*Cw*(Yw1*As+We) + 2*Cw*Y2*Ab + 2*Cw*Yl*Af + K*[sum(i,Cr*Di(i)*(2*(Yw1*As+We)/3 + Yl*Af + Y2*Ab)/Ca(i) + Cp*Di(i)*((Yw1*As+We)/2 + Y2*Ab)/Vp) + Nr*Co*(Yl*Af*(Np-1)/(Np+1) + ((Yw1*As) + We)*Yl*(1-((Yl-1)/(2*Yl))**Np))] + K*sum(i,(Ai(i)*Di(i)/Q(i))+ Ci(i)*Q(i)/2 + Ci(i)*Si(i));

Capr.. sum(i,Q(i)+Si(i))=I=Y2*Ab*Bb*As*Yw1;

Capd.. sum(i,Ca(i))=I=Yl*Af*Bf*As*Yw1;

model prueba II /all/;

solve prueba II using nlp minimizing Z;

Execute_unload 'results.gdx' Q

Execute 'gdxxrw.exe results.gdx var= Q ';

3. Distribución con área central

\$ title Distribucion con area central

set

i Tipo de SKU /1*800/;

Parameters

Ab Suma del ancho de los pasillos y dos veces la profundidad del pallet rack /20/

Af Suma del ancho de los pasillos y dos veces la profundidad(ancho) del estante /8/

As Profundidad de un estante /4/

Ap profundidad de un pallet /4/

Ca1 Costo de construccion por unidad de area del area delantera /30/

Ca2 Costo de construccion por unidad de area del area de reserva /25/

Cw Costo de construccion por unidad de longitud de los muros externos /1000/

Co Costo de alistamiento por unidad de distancia viajada /0.0068/

Cp Costo de guardar por unidad de distancia viajada /0.0024/

Cr Costo de reaprovisionamiento por unidad de distancia viajada /0.0028/

Np Numero de paradas (picks) por viaje de alistamiento /80/

Nr Numero promedio de viajes de alistamiento al año /180/

Vp Numero neto de productos almacenados por pallet /64/

Bb Factor de utilizacion del espacio en el area de reserva /5.38/

Bf Factor de utilizacion del espacio en el area delantera /1.75/

K Valor presente neto del factor de descuento /4.191/;

parameter

Ci(i) Costo de mantenimiento de inventarios del SKU i

Ai(i) Costo fijo por ordenar reaprovisionamiento externo del SKU i

Di(i) Demanda del SKU i

Si(i) Inventario de seguridad del SKU i ;

```

option seed =0;
loop(i, Ci(i)=uniform(0.3,6.5))
loop(i, Ai(i)=uniform(20,100))
loop(i, Di(i)=uniform(10,200))
loop(i, Si(i)=uniform(5,60));

```

Variables

Y1 Numero de pasillos en el area delantera
Y2 Numero de pasillos en el area trasera
Yw1 Numero de estantes por pasillo en el area delantera
Yw2 Numero de lugares para pallet en el area trasera
Q(i) Cantidad a pedir del SKU i en unidades de volumen
Ca(i) Cantidad a almacenar en el area delantera del SKU i
Z Costo;

Positive variables Q, Ca, Y1, Y2, Yw1, Yw2;

Y1.lo = 1;
Q.lo(i) = 0.01;
Ca.lo(i) = 0.01;

equations

Costo Costo total
Capr Capacidad del area de reserva
Capd Capacidad del area delantera;

Costo.. $Z = e = Ca1 * Y1 * Af * Yw1 * As + Ca2 * Y2 * Ab * Yw2 * Ap + 2 * Cw * (Y2 * Ab + Y1 * Af + Yw1 * Ap) + K * [\sum(i, Cr * Di(i) * (4 * Yw1 * Ap / 3 + Y2 * Ab + Y1 * Af) / Ca(i) + Cp * Di(i) * (Y2 * Ab / 2 + Yw2 * Ap) / Vp) + Nr * Co * (2 * Y1 * Af * (Np - 1) / (Np + 1) + Yw1 * As * Y1 * (1 - ((Y1 - 1) / Y1) ** Np) + 0.5 * Yw1 * As)] + K * \sum(i, (Ai(i) * Di(i) / Q(i)) + Ci(i) * Q(i) / 2 + Ci(i) * Si(i)) ;$

Capr.. $\sum(i, Q(i) + Si(i)) = L = Yw1 * Ap * Y2 * Ab * Bb;$

Capd.. $\sum(i, Ca(i)) = L = Yw2 * As * Y1 * Af * Bf;$

```
model prueba /all/;
```

```
solve prueba using nlp minimizing Z;
```

```
Execute_unload 'results.gdx' Q
```

```
Execute 'gdxxrw.exe results.gdx var= Q ';
```

Anexo C. Artículo científico

Diseño de un modelo de distribución óptimo para un área de almacenamiento de operación manual basado en la estrategia “Forward-Reserve”

Design of an optimal distribution model for a manual storage area based on strategy “Forward Reserve”

David Esteban Puentes Garzón⁸⁴

Edwin Alberto Garavito Hernández⁸⁵

Resumen

Un gran número de almacenes ha optado por disponer de sus productos en dos áreas diferenciadas; un área de delantera (Forward Area) que facilite las actividades de alistamiento de pedidos y un área de reserva (Reserve Area) que permita un mayor aprovechamiento del espacio disponible. El problema asociado a determinar la cantidad a almacenar de ciertos productos en el área delantera, de tal manera que se alcance un balance entre los costos de alistamiento y de reaprovisionamiento interno es conocido como Forward-Reserve Problem.

⁸⁴ Universidad Industrial de Santander. Escuela de estudios industriales y empresariales. Colombia. Estudiante de Ingeniería Industrial. david.puentes1@correo.uis.edu.co

⁸⁵ Universidad Industrial de Santander. Escuela de estudios industriales y empresariales. Colombia. Ingeniero Industrial especialista en Gerencia de la Producción - Mejoramiento Continuo y Docencia Universitaria. garavito@uis.edu.co

Correspondencia: Edwin Alberto Garavito Hernández: Carrera 27 calle 9, Bucaramanga (Colombia). Teléfono: 6348579, garavito@uis.edu.co

Este problema de asignación ha sido abordado por diversos investigadores y bajo diferentes enfoques; sin embargo, hay un reducido número de trabajos orientados al diseño de áreas de almacenamiento que operen con la estrategia Forward-Reserve. Por este motivo, se comparan diversos modelos de distribución de pasillos con el objetivo de dictaminar la distribución que minimice los costos de construcción, manipulación e inventario, por lo que se plantean modelos matemáticos, obteniendo como resultado las dimensiones óptimas del almacén y las cantidades a almacenar en cada área considerada. Subsecuentemente, se realiza un diseño experimental y un análisis estadístico de los resultados con el fin de determinar la influencia de algunos factores en la función objetivo y establecer la distribución más económica.

Palabras clave: Alistamiento de pedidos, almacenes, diseño de sistemas de almacenamiento, forward-reserve.

Abstract

Many warehouse have opted to store their products in two areas; a forward area that facilitates order picking activities and reserve area that allows a greater use of the available space. The Problem associate to determinate the quantity to storage of certain products into the Forward area, such that is achieves a balance between the order picking cost and internal supply cost is knows how Forward Reserve Problem.

This assignation problem has been treated for several investigators under different approaches; however, there is a small number of works about the design of storage areas, which operate with the strategy Forward Reserve. For this reason, are compared diverse aisles distribution models with the objective to choose the distribution that minimizes the costs of building, manipulation and warehousing, by means of the proposition of a mathematical model, getting as an outcome the optimal dimensions, and quantities to storage, in each area. Subsequently, it is

developed an experimental design and a statistical analysis for the outcomes in order to determine the influence of some factors on the target function and to establish the distribution cheapest (most economic).

Keywords: Design of a storage system, forward-reserve problem, order picking, warehouse.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los clientes son más exigentes y no están dispuestos a adaptarse a los productos de las empresas, ni a sus criterios de trabajo, situación que ha forzado a las organizaciones a reducir sus tiempos de respuesta, mientras alcanzan grandes volúmenes de producción y distribución, haciendo uso mínimo de la función de almacenamiento a lo largo de la cadena de suministro.

La planeación, operación y control de manera eficiente de los almacenes como un nodo determinado de la red de suministro, permite el alcance de estos objetivos al ser una disposición física que compensa las diferencias entre los flujos de abastecimiento y demanda, además de reducir los costos de transporte y producción.

Entre las actividades que se llevan a cabo al interior de los almacenes, la recolección de pedidos (order picking) es la que más costo representa, siendo los extensos tiempos de viaje el componente que más contribuye.

Con el fin de hacer más rápida la recolección de pedidos, en diversos casos resulta eficiente dividir el almacén en dos partes: una de menor tamaño para almacenar una cantidad específica de ciertas unidades de almacenamiento (SKUs), y una segunda que no sólo almacene grandes volúmenes, sino que también reaprovicione al área menor. Esta segunda área, de mayor tamaño, recibe el nombre de “Reserve Area”.

Hackman; Rosenblatt y Olin [1] fueron los primeros autores en presentar un modelo matemático que permitiera estimar los SKUs (unidades de almacenamiento) a almacenar en la *Forward Area*, y su respectiva cantidad. Este modelo es similar al clásico problema de la mochila (Knapsack) a excepción de que la función objetivo no es lineal y presenta una discontinuidad en cero, por lo que Hackman, Rosenblatt y Olin proponen un algoritmo codicioso para resolver el problema de asignación Forward-Reserve.

Contribuciones adicionales fueron propuestas por Van den Berg et al. [2] quienes asumieron que el reaprovisionamiento se hacía de forma instantánea, por lo que solo se necesitaba almacenar un SKU en la *Forward Area*. Otros autores [3]-[7] han propuesto diversas heurísticas para resolver el *FRP*, donde la mayoría de ellas se han enfocado al nivel táctico, es decir a la elección de qué artículos almacenar, en qué cantidad y el tamaño de la *Forward Area*, asumiendo la disposición de espacio como un parámetro conocido, o en algunos casos ignorando su carácter restrictivo.

A menudo el diseño de almacenes suele enfocarse a temas referentes al diseño civil, pero se desconoce su función logística y operativa, por lo que Jinxiang Gu [8] en 2005 desarrolló un modelo integrado que equilibra las compensaciones de los elementos de costo en orden de alcanzar un diseño óptimo. Este modelo no sólo considera el *FRP* como un problema de asignación, sino que también incluye el dimensionamiento como variable y toma en cuenta la configuración de los pasillos para optimizar el costo del ciclo de vida del almacén y a su vez el order picking.

El problema principal que se aborda en este artículo es el dimensionamiento del área delantera y de reserva y como sub-problema la distribución de los pasillos. Así, el objetivo que se quiere alcanzar es minimizar el costo del ciclo de vida del almacén al reducir de manera conjunta los costos de construcción, de inventarios y manipulación de materiales.

2. METODOLOGÍA

En orden de determinar las dimensiones óptimas del área de almacenamiento, la orden de pedido y la cantidad a almacenar de cada SKU en el área delantera, se plantea un modelo matemático para cada uno de los modelos de distribución considerados. Posteriormente, en la sección 3 se plantea un diseño experimental 2^4 para determinar la influencia de algunos factores de diseño y finalmente una comparación estadística de los resultados para establecer el modelo de distribución más económico.

Para el desarrollo de los modelos, se asume el uso de estantes y anaqueles en el área delantera y de reserva respectivamente. A continuación se presentan los parámetros, variables y supuestos asumidos en la investigación.

Supuestos

- La demanda es constante en el horizonte de tiempo de planeación
- El reaprovisionamiento del área delantera se asume como instantáneo, de tal manera que un SKU es reaprovisionado cuando su nivel de inventario llegue a 0. El reaprovisionamiento externo se da cuando el inventario del SKU alcanza el nivel de inventario de seguridad.
- El almacenamiento se da de manera aleatoria
- Los recorridos al interior de las áreas se hace siguiendo una estrategia de ruteo transversal o en S
- Todos los SKU serán almacenados en el área delantera
- Los pedidos de los clientes son tomados en el área delantera
- El reaprovisionamiento del área de reserva se hace por estiba, mientras que en el área delantera puede ser realizado en un único viaje

Variables

Y_i : Número de pasillos en el área delantera

Y_2 : Número de pasillos en el área de reserva

Y_{w1} : Número de estantes por pasillos en el área delantera

Y_{w2} : Número de anaqueles por pasillo en el área de reserva

Q_i : Orden de pedido del SKU i en unidades de volumen

Ca_i : Cantidad a almacenar en el área delantera del SKU i en unidad de Volumen

Definición de parámetros:

Conjuntos

i : Conjunto para el tipo de SKU

Parámetros

A_b : Suma del ancho del pasillo y dos veces la profundidad del estante (Área Delantera)

A_f : Suma del ancho del pasillo y dos veces la profundidad del anaquel (Área de Reserva)

A_s : Ancho del estante

A_p : Ancho del anaquel

A_i : Costo fijo por ordenar reaprovisionamiento externo del SKU i

C_{a1} : Costo de construcción por unidad de área del área delantera

C_{a2} : Costo de construcción por unidad de área del área de reserva

C_w : Costo de construcción por unidad de longitud de los muros

C_i : Costo anual por mantenimiento de inventarios del SKU i

C_o : Costo de alistamiento de pedidos por unidad de distancia viajada

C_p : Costo de aprovisionamiento del área de reserva por distancia viajada

C_r : Costo de reaprovisionamiento del área delantera por distancia viajada

D_i : Demanda anual del SKU i

N_p : Número de paradas (picks) por viajes de alistamiento

N_r : Número promedio de viajes de alistamiento al año

V_p : Número neto de productos almacenados por estiba

B_b : Factor de utilización del espacio en el área delantera

B_f : Factor de utilización del espacio en el área de reserva

W_e : Ancho del pasillo central

S_i : Inventario de seguridad del SKU i

T : Horizonte de tiempo planeado para la operación del almacén

r : Tasa de operación discontinua

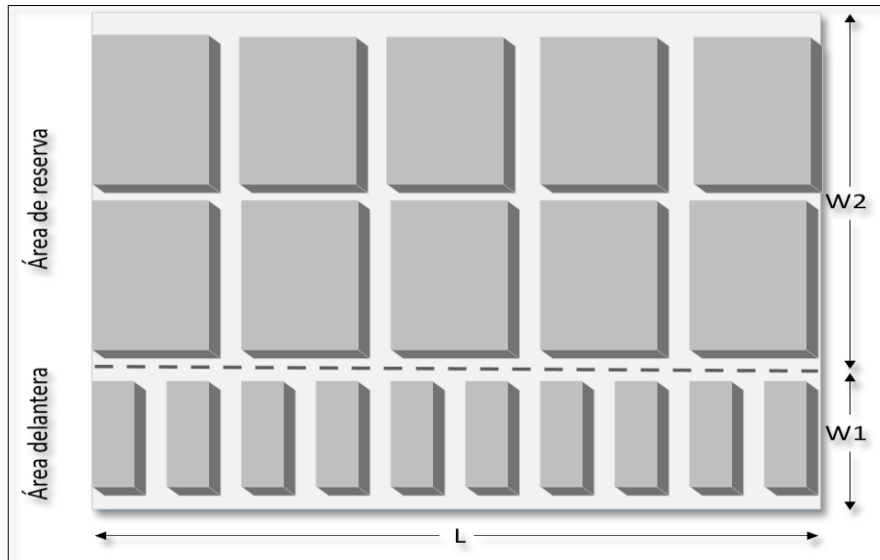
Z : Valor presente neto del factor discontinuo

Donde: $Z = \sum_{i=1}^T (1 + r)^{-t}$

Formulación de modelos matemáticos

El primer modelo considerado es presentado por Jinxiang Gu, quien minimiza el costo del ciclo de vida del almacén para una distribución de pasillos verticales, además de disponer el área delantera en la parte frontal del almacén, como indica la ilustración 1.

Ilustración 1: Distribución de pasillos verticales



Donde:

$$\text{Ancho del almacén} = L = Y_l * A_f$$

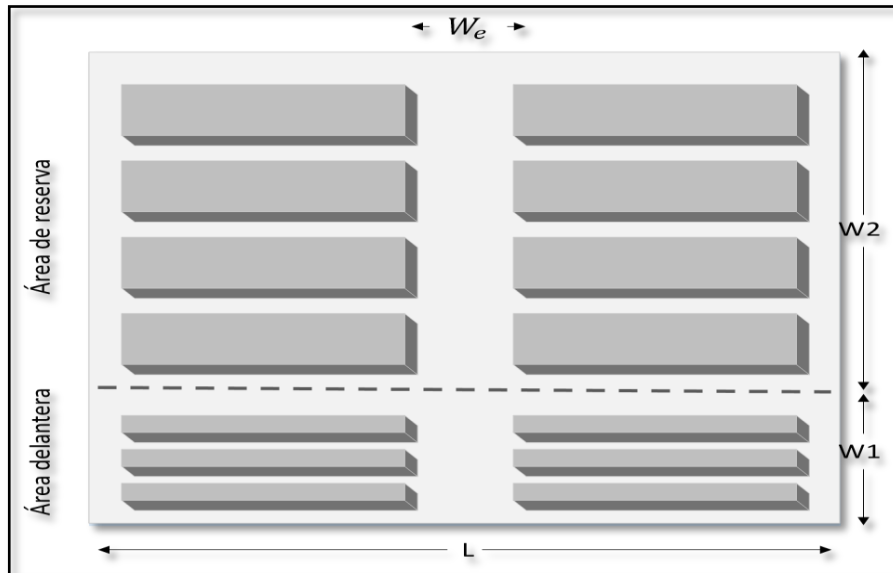
$$\text{Profundidad del área delantera} = W_1 = Y_{w1} * A_s$$

$$\text{Profundidad del área de reserva} = W_2 = Y_{w2} * A_p$$

El modelo de distribución de pasillos horizontales es presentado como una primera alternativa al modelo estudiado en la literatura. Este tipo de distribución ubica los pasillos de manera horizontal, dejando entre ellos un pasillo central para permitir el flujo de mercancías.

A diferencia del modelo anterior, el ancho del almacén está dado por el número de estantes por pasillo en el área delantera, mientras que la profundidad depende del número de pasillos. En la ilustración 2 se muestra esta distribución.

Ilustración 2: Distribución de pasillos horizontales



Donde:

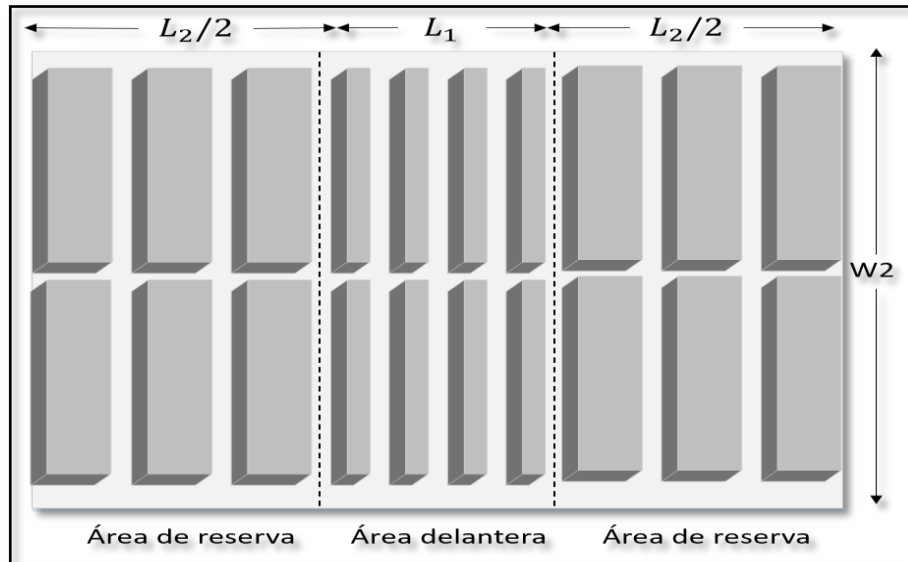
$$\text{Ancho del almacén} = L = Y_{w1} * A_s + W_e$$

$$\text{Profundidad del área delantera} = W_1 = Y_l * A_f$$

$$\text{Profundidad del área de reserva} = W_2 = Y_2 * A_b$$

Como segunda alternativa de diseño, se sugiere una distribución que ubica el área delantera en el centro del almacén, lo cual difiere de las dos propuestas anteriores, donde el área delantera se situaba en la parte frontal. Adicionalmente, se asume una distribución de pasillos verticales, como lo indica la ilustración 3.

Ilustración 3: Distribución de pasillos con área central



Donde:

$$\text{Ancho del almacén} = L = L_1 + L_2$$

$$\text{Profundidad del almacén} = W_2 = Y_{w2} * A_p$$

$$\text{Ancho del área de reserva} = L_2 = Y_2 * A_b$$

$$\text{Ancho del área delantera} = L_1 = Y_1 * A_f$$

A continuación, se presenta los elementos de costo que hacen parte de la función objetivo de cada una de las distribuciones, además de las restricciones a las que están sujetas.

Costo de construcción

El costo de construcción es modelado en función del área delantera, de reserva y del perímetro del almacén, de acuerdo al modelo propuesto por Francis y White [9]. El costo de construcción para las distribuciones de pasillos horizontales y

verticales está dado por la ecuación (1), mientras que la ecuación (2) representa el costo para la distribución con área central

$$\text{Pasillos Verticales: } (C_{a1} * L * W_1) + (C_{a2} * L * W_2) + 2 * C_w * (W_1 + W_2 + L) \quad (1)$$

$$\text{Área Central: } (C_{a1} * L_1 * W_1) + (C_{a2} * L_2 * W_1) + 2 * C_w * (W_1 + L) \quad (2)$$

Costo de manipulación

Asumiendo una aproximación continua de la distancia rectilínea, el recorrido del operario para el aprovisionamiento externo se calcula como:

$$\text{Pasillos verticales y horizontales: } \frac{2}{L * W_1} * \int_0^{W_2} \int_{-L/2}^{L/2} |X| + |Y| dx \cdot dy \quad (3)$$

$$\text{Área Central: } \frac{2}{L * W_2} * \int_0^{W_2} \int_{-L_2/2}^{L_2/2} |X| + |Y| dx \cdot dy \quad (4)$$

Al integrar las funciones, se obtiene la expresión para estimar la distancia recorrida y subsecuentemente el costo anual de aprovisionamiento externo (AE).

$$\text{Pasillos verticales y horizontales: } \sum_i C_p * \left(\frac{L}{2} + W_2\right) * \frac{D_i}{V_p} \quad (5)$$

$$\text{Área central: } \sum_i C_p * \left(\frac{L_2}{2} + W_2\right) * \frac{D_i}{V_p} \quad (6)$$

Dado que el área delantera debe ser aprovisionada por el área de reserva, la distancia recorrida en este proceso también se calcula como una aproximación continua de distancias rectilíneas, donde (7) estima la distancia para las distribuciones de pasillos verticales y horizontales, mientras que (8) lo hace para la distribución con área central.

$$\text{Distancia: } \frac{2}{L^2 * W_1 * W_2} * \int_{W_2}^{W_2 + W_1} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{W_2} \int_{-L/2}^{L/2} |X_1 - X_2| + |Y_1 - Y_2| dx \cdot dy \cdot dx_1 \cdot dx_2 \quad (7)$$

$$\text{Distancia: } \frac{4}{L^2 * W^2} * \int_{L_2/2}^{\frac{L_2 + L_1}{2}} \int_{-W_1/2}^{W_1/2} \int_0^{L_2/2} \int_{-W_1/2}^{W_1/2} |X_1 - X_2| + |Y_1 - Y_2| dx \cdot dy \cdot dx_1 \cdot dx_2 \quad (8)$$

Al integrar las funciones, se calcula la distancia recorrida, lo que permite estimar el costo anual por aprovisionamiento interno para las diferentes distribuciones, así:

$$\text{Pasillos verticales y horizontales: } \sum_i C_r * \left(\frac{2}{3}L + W_1 + W_2\right) * \frac{D_i}{ca_i} \quad (9)$$

$$\text{Área central: } \sum_i C_r * \left(\frac{4}{3}L + W_1 + W_2\right) * \frac{D_i}{ca_i} \quad (10)$$

Como tercer costo de manipulación, está el costo asociado al alistamiento de pedidos. Considerando una estrategia de ruteo transversal y almacenamiento aleatorio, la distancia recorrida y el costo de alistamiento según Hall [10] están dado por:

$$\text{Distancia por alistamiento: } 2 * L * \left[\frac{N_p-1}{N_p+1}\right] + W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l-1}{Y_l}\right)^{N_p}\right] + 0.5W_1 \quad (11)$$

$$\text{Costo anual: } C_0 * N_r * \left(2 * L * \left[\frac{N_p-1}{N_p+1}\right] + W_1 * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l-1}{Y_l}\right)^{N_p}\right] + 0.5W_1\right) \quad (12)$$

Estas expresiones son adecuadas cuando los pasillos están distribuidos de manera vertical, como el caso de la distribución de pasillos verticales y con área central, sin embargo, para la distribución de pasillos horizontales es preciso hacer algunas modificaciones de acuerdo al modelo propuesto por Caron, Marchet y Perego [11]. La distancia recorrida y el costo del alistamiento de pedidos para pasillos horizontales están dados por:

$$\text{Distancia por alistamiento: } W_1 * \left[\frac{N_p-1}{N_p+1}\right] + L * Y_l * \left[1 - \left(\frac{2*Y_l-1}{2*Y_l}\right)^{N_p}\right] \quad (12)$$

$$\text{Costo anual: } C_0 * N_r * \left(2 * W_1 * \left[\frac{N_p-1}{N_p+1}\right] + L * Y_l * \left[1 - \left(\frac{Y_l-1}{2*Y_l}\right)^{N_p}\right] + 0.5L\right) \quad (13)$$

El costo anual por manipulación es calculado como la suma del costo anual de aprovisionamiento externo, aprovisionamiento interno y alistamiento de pedidos.

Costo de inventarios

El costo de inventarios es el mismo para las tres distribuciones estudiadas y es equivalente a la suma del costo de preparación y el costo de almacenamiento, como se muestra en la expresión (14).

$$\text{Costo total de inventario} = \sum_i A_i \frac{D_i}{Q_i} + C_{i*} \left(\frac{Q_i}{2} + S_i \right) \quad (14)$$

Adicional a estos tres elementos de costos, el diseño de almacén debe disponer de suficiente espacio para garantizar que los productos sean almacenados en el área delantera y de reserva, según sea el caso, por lo que se debe cumplir:

$$\text{Espacio requerido para satisfacer la demanda} \leq \text{Espacio disponible}$$

Sharp [12] establece que la utilización de espacio es afectada por factores como: eficiencia volumétrica, lugares vacíos y fluctuaciones cíclicas, por lo que define el factor de utilización (B_b y B_f) en función del área esperada por pasillo y del número de estibas por unidad de área. Haciendo uso de este factor de utilización, los requerimientos de espacio para el área delantera y de reserva se expresa así:

$$\text{Área de reserva: } \sum_i (Q_i + S_i) \leq B_b * L * W_2 \quad (15)$$

$$\text{Área delantera: } \sum_i C a_i \leq B_f * L * W_1 \quad (16)$$

En resumen, se define una función objetivo por cada distribución que representa el costo del ciclo de vida del almacén, incluyendo el costo de construcción y el valor neto del costo discontinuo de operación. Como restricciones se considera la capacidad de cada una de las áreas. Esta función se representa así:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } (x) = & \text{Costo de construcción} + Z * (\text{Costo de manipulación} \\ & + \text{Costo de inventario}) \end{aligned}$$

S.A

$$\sum_i (Q_i + S_i) \leq B_b * L * W_2$$

$$\sum_i C a_i \leq B_f * L * W_1$$

$$Q_i, C a_i \geq 0, \forall i$$

$$Y_l, Y_{w1}, Y_{w2} \in Z_+^3$$

1. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En esta sección, se evalúan y comparan los modelos de distribución considerando los mismos parámetros asumidos por Jinxiang Gu [8]. Para evaluar las variaciones en las dimensiones del almacén se consideran cinco instancias para cada disposición, donde cada una ella almacena diferentes cantidades de SKUs (600, 800, 1000, 1200,1400).

En las tablas 1, 2 y 3 se exponen los valores de las dimensiones que optimizan el costo del ciclo de vida del almacén para cada una de las distribuciones.

Tabla 1: Dimensiones óptimas modelo de pasillos verticales

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS VERTICALES					
VARIABLE	600	800	1000	1200	1400
Y_l	11,818	14,091	15,863	17,55	19,023
Y_{w1}	2,088	2,634	3,225	3,783	4,273
Y_{w2}	20,641	24,266	26,804	29,193	31,268
L	94,544	112,728	126,904	140,4	152,184
W1	8,352	10,536	12,9	15,132	17,092
W2	82,564	97,064	107,216	116,772	125,072
W2+W1	90,916	107,6	120,116	131,904	142,164

ÁREA TOTAL	8595,562	12129,533	15243,201	18519,322	21635,086
ÁREA DELANTERA	789,631	1187,702	1637,062	2124,533	2601,129
ÁREA DE RESERVA	7805,931	10941,831	13606,139	16394,789	19033,957
COSTO	\$ 1.392.900	\$ 1.827.400	\$ 2.273.500	\$ 2.702.300	\$ 3.095.200

Tabla 2: Dimensiones óptimas modelo de pasillos horizontales

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS HORIZONTALES					
VARIABLE	600	800	1000	1200	1400
YL	1,014	1,283	1,567	1,838	2,08
Y2	4,004	4,639	5,208	5,676	6,081
YW1	24,318	28,622	32,604	36,05	39,07
YW2	0	0	0	0	0
L	102,272	119,488	135,416	149,2	161,28
W1	8,112	10,264	12,536	14,704	16,64
W2	80,08	92,78	104,16	113,52	121,62
W2+W1	88,192	103,044	116,696	128,224	138,26
ÁREA TOTAL	9019,572224	12312,52147	15802,50554	19131,0208	22298,5728
ÁREA DELANTERA	829,630464	1226,424832	1697,574976	2193,8368	2683,6992
ÁREA DE RESERVA	8189,94176	11086,09664	14104,93056	16937,184	19614,8736
COSTO	\$ 1.414.300	\$ 1.850.800	\$ 2.298.800	\$ 2.729.200	\$ 3.122.800

Tabla 3: Dimensiones óptimas modelo con área central

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE PASILLOS HORIZONTALES					
VARIABLE	600	800	1000	1200	1400
YL	1,274	1,621	1,991	2,349	2,669
Y2	4,243	4,945	5,575	6,105	6,567
YW1	22,978	26,898	30,477	33,531	36,189
YW2	22,978	26,898	30,477	33,531	36,189
L	95,052	111,868	127,428	140,892	152,692
W1	91,912	107,592	121,908	134,124	144,756

L1	10,192	12,968	15,928	18,792	21,352
L2	84,86	98,9	111,5	122,1	131,34
ÁREA TOTAL	8736.419	12036,102	15534,493	18896,999	22103,083
ÁREA DELANTERA	936.767	1395,253	1941,751	2520,458	3090,830
ÁREA DE RESERVA	7799,652	10640,849	13592,742	16376,540	19012,253
COSTO	\$ 1.408.200	\$ 1.849.100	\$ 2.302.700	\$ 2.739.300	\$ 3.139.100

Los modelos son resueltos en GAMS/CONOPT como sugerencia de la literatura, sin embargo, esta herramienta resuelve problemas continuos no lineales, por lo que se aproximan los valores de las variables al entero más próximo, lo que sigue siendo una solución óptima. Por ejemplo, un almacén con pasillos verticales y 800 tipos de SKUs conseguirá minimizar el costo del ciclo de vida del almacén si:

- El área delantera está compuesta por 14 pasillos y 3 estantes por pasillo
- El área de reserva la componen 6 pasillos y 24 estantes por pasillo

Diseño experimental

El interés se centra en caracterizar el área de almacenamiento; es decir, determinar los factores que afectan el costo del ciclo de vida del almacén. Para ello se diseña un experimento que permita estimar cuanto varía la variable respuesta cuando se modifica cada factor, y si la modificación de los factores en conjunto produce resultados diferentes a los obtenidos con la modificación individual. Dado que se desea identificar los factores críticos de las distribuciones estudiadas, se plantean tres diseños experimentales 2^4 con una réplica. Los factores, rangos y niveles del experimento se muestran en la tabla 4

Tabla 4: Factores, rangos y niveles del diseño experimental

Factor	Rango	Nivel
Tipo de distribución	1-2-3	Dos niveles

Número promedio de viajes de alistamiento por año (N_r)	50%	Dos niveles
Demanda	10%	Dos niveles
Costo de reaprovisionamiento interno (C_r)	50%	Dos niveles

Al comparar los resultados de los tres experimentos se puede concluir que:

- El costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área se ve afectado por la variación en los niveles de los factores: tipo de disposición, costo de reaprovisionamiento interno y demanda.
- La variación en la demanda no tiene efecto cuando se decide cambiar de una disposición de pasillos verticales a una disposición de con área central.
- Cambiar de un tipo de disposición de pasillos verticales a cualquiera de las dos alternativas de diseño tiene un efecto negativo, es decir; el costo del ciclo de vida del almacén por unidad de área será menor en las disposición 2 y 3. No obstante, el cambiar de una disposición tipo 2 a una tipo 3 tiene un efecto positivo, lo que es igual a un aumento en la variable respuesta. Por lo tanto la disposición 3 tiene el menor costo por unidad de área, seguido de la disposición 2 y finalmente la disposición 1.

Comparación de modelos

Hasta el momento se han identificado los parámetros que tienen efecto sobre la variable respuesta y el costo por unidad de área de las tres disposiciones, sin embargo, aún no se tiene certeza de cual distribución es la que genera el menor costo. Por este motivo, se hace uso de las pruebas de hipótesis como herramienta

de comparación. A continuación se plantean las pruebas de hipótesis para el costo del ciclo de vida del almacén, el área total y el costo de operación.

Prueba de hipótesis sobre el costo del ciclo de vida del almacén

Tanto para esta prueba como para las demás, se plantean hipótesis sobre las medias de dos distribuciones normales, asumiendo varianzas desconocidas e iguales con una muestra de 15 valores y un nivel de significancia del 5%. La notación y el estadístico de prueba están dadas por:

$$\mu_1 = \text{Costo promedio del ciclo de vida del almacén para la distribución 1}$$

$$\mu_2 = \text{Costo promedio del ciclo de vida del almacén para la distribución 2}$$

$$\mu_3 = \text{Costo promedio del ciclo de vida del almacén para la distribución 3}$$

$$\text{Estadístico de prueba} = t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Dónde S_p es un estimador combinado de la desviación estándar y X es el promedio de la muestra de tamaño n . Haciendo uso del software Minitab, se calculan los valores del estadístico de prueba y el intervalo de confianza. Los resultados de las pruebas de hipótesis se consolidan en la tabla 5.

Tabla 5: Pruebas de hipótesis sobre el costo del ciclo de vida del almacén

Prueba de hipótesis	Región de Rechazo	t_0	Intervalo de confianza
$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-2.62	-38328 < -21520 < -4712
$H_0: \mu_1 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-1.91	-32521 < -15673 < 1175
$H_0: \mu_2 - \mu_3 = 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$	0.71	-11032 < 5847 < 22726

$H_a: \mu_2 - \mu_3 \neq 0$	$-1.701 < t_0 < 1.701$		
-----------------------------	------------------------	--	--

A un nivel de significancia del 5%, existe evidencia suficiente para suponer que el costo del ciclo de vida del almacén es menor para la distribución de pasillos verticales, mientras que el costo de las distribuciones de pasillos horizontales y con área central aparentemente es igual.

Prueba de hipótesis sobre el área total del almacén (área delantera y de reserva)

Ya se ha evaluado el costo total del ciclo de vida del almacén y el costo por unidad de área, por lo que ahora se compara el área total de cada disposición, con el objetivo de determinar cuál de ellas es la que mayor espacio requiere para satisfacer los requerimientos del almacén.

La notación empleada para estas pruebas eta dada por:

$$\mu_1 = \text{Área promedio de la distribución 1}$$

$$\mu_2 = \text{Área promedio de la distribución 2}$$

$$\mu_3 = \text{Área promedio de la distribución 3}$$

En la tabla 6 se muestran las tres pruebas de hipótesis para el área del almacén.

Tabla 6: Pruebas de hipótesis sobre el área total

Prueba de hipótesis	Región de Rechazo	t_0	Intervalo de confianza
$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-5	$-702.4 < -498.3 < -294.2$
$H_0: \mu_1 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_1 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	-2.62	$-257.5 < -144.4 < -31.3$
$H_0: \mu_2 - \mu_3 = 0$ $H_a: \mu_2 - \mu_3 \neq 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$ $-1.701 < t_0 < 1.701$	3.54	$149.4 < 353.9 < 558.5$

Existe evidencia suficiente para concluir que la disposición de pasillos verticales es la que menor espacio ocupa, siendo seguida por la disposición con área central y la disposición de pasillos horizontales. Estos resultados también permiten hacer deducciones sobre el costo de construcción, puesto que es calculado en función del área. Por lo tanto, la disposición de pasillos verticales tiene el menor costo de construcción, mientras que la disposición de pasillos horizontales es la más costosa de las tres.

Prueba de hipótesis sobre el costo de operación del almacén

El costo de ciclo de vida del almacén está constituido por un costo de construcción, un costo de manipulación y uno por manejo inventarios, siendo estos dos últimos los responsables de la operación del almacén. Esta prueba de hipótesis se plantea con el objetivo de comparar los costos de operación de las tres disposiciones, y así poder emitir un juicio sobre cuál de ellas es la más económica. A continuación se presenta la notación empleada para el desarrollo de la prueba.

$$\mu_1 = \text{Costo promedio de operación de la distribución 1}$$

$$\mu_2 = \text{Costo promedio de operación de la distribución 2}$$

$$\mu_3 = \text{Costo promedio de operación de la distribución 3}$$

En la tabla 7 se muestran las tres pruebas de hipótesis para el área del almacén.

Tabla 27: Media y desviación estándar del costo de operación

Prueba de hipótesis	Región de Rechazo	t_0	Intervalo de confianza
$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$	-0.1	-13837 < -617 < -12604
$H_a: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	$-1.701 < t_0 < 1.701$		

$H_0: \mu_1 - \mu_3 = 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$	-1.27	-21500 < -8247 < 5006
$H_a: \mu_1 - \mu_3 \neq 0$	$-1.701 < t_0 < 1.701$		
$H_0: \mu_2 - \mu_3 = 0$	$-t_{0.05;28} < t_0 < t_{0.05;28}$	-1.18	-20882 < -7631 < 5620
$H_a: \mu_2 - \mu_3 \neq 0$	$-1.701 < t_0 < 1.701$		

Se observa que los valores del estadístico de prueba para las tres hipótesis se encuentran en la región de aceptación, por lo que a un nivel de significancia del 5%, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula. Esto permite concluir que no existe evidencia para afirmar que los valores del costo de operación son diferentes para las tres disposiciones.

3. CONCLUSIONES

Este artículo compara diferentes modelos de distribución con el objetivo de determinar aquel que minimice el costo total del ciclo de vida del almacén. Se resaltan las siguientes conclusiones:

- El costo del ciclo de vida del almacén se ve afectado por la variación en los niveles de factores tales como: el tipo de distribución, la demanda y el número promedio de viajes de alistamiento por año.
- Al evaluar los resultados obtenidos, se encuentra que la distribución de pasillos verticales es la mejor opción de diseño para un área de almacenamiento. A pesar de que esta distribución tiene el mayor costo por unidad de área, es la distribución con el menor costo del ciclo de vida del almacén y la menor área, es decir; los requerimientos del almacén van a ser satisfechos en un área más reducida en comparación con las otras distribuciones, y a un menor costo. Adicionalmente, no existe evidencia para suponer que el costo de operación sea diferente en las tres distribuciones.

- El uso de herramientas como GAMS/CONOPT resulta ser adecuado cuando el número de SKUs y la demanda toman valores reducidos, sin embargo, para problemas de mayor envergadura, se debe considerar otros métodos de solución como la Solución Generalizada de Bender, un algoritmo codicioso o un algoritmo Branch and Bound.

REFERENCIAS

- [1] S. Hackman, M. Rosenblatt y J. Olin, «Allocating items to an automated storage and retrieval system,» *IIE Transactions*, vol. 22, nº 1, pp. 7-14, 1990.
- [2] J. P. van den Berg, G. P. Sharp, A. J. R. M. (Noud. Gademann, and Y. Pochet, “Forward-reserve allocation in a warehouse with unit-load replenishments,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 111, no. 1, pp. 98–113, 1998.
- [3] B. B. K. Hollingsworth, “Decision Strategy to Minimize Replenishment Costs in a Distribution Center with Forward-reserve Storage,” no. June, p. 82, 2003.
- [4] J. Gu, M. Goetschalckx, and L. F. McGinnis, “Solving the forward-reserve allocation problem in warehouse order picking systems,” *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 61, no. 6, pp. 1013–1021, 2010.
- [5] L. M. Thomas and R. D. Meller, “A Warehouse Model for Replenishment to a Bottom-Level Forward Area with Random Storage,” 2012.
- [6] D. B. Durdevic and M. D. Miljus, “the Procedure Proposal for Order Pick Area Design,” *Teh. Vjesn. Gaz.*, vol. 20, no. 1, pp. 85–91, 2013.
- [7] R. Walter, N. Boysen, and A. Scholl, “The discrete forward-reserve problem - Allocating space, selecting products, and area sizing in forward order picking,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 229, no. 3, pp. 585–594, 2013.

- [8] J. Gu, "The forward reserve warehouse sizing and dimensioning problem," Ph.D dissertation, Dept Industrial Eng, Georgia Institute of Technology, Georgia. December 2005.
- [9] J. White y R. Francis, «Normative models for some warehouses sizing problema,» AIIE Transactions, vol. 3, nº 3, pp. 185-190, 1971.
- [10] F. Caron, G. Marchet y A. Perego, «Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part system,» International Journal of Production Research, vol. 36, nº 3, pp. 713-732, 1998.
- [11] S. Gunter, «Warehouses Management» de Handbook of industrial engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2001, pp. 2083-2109.