INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY
ESCUELA DE INGENIERIA Y TECNOLOGIAS
DE INFORMACION
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



ESTRATEGIA DE ALMACENAMIENTO DEDICADO DISTRIBUIDO ADMINISTRADO POR UN SISTEMA DE IDENTIFICACION POR RADIOFRECUENCIA (RFID)

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

POR:
ING. ERICK ULISES ESLAVA VENTURA

MONTERREY, N. L.

MAYO DE 2012

INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY
ESCUELA DE INGENIERIA Y TECNOLOGIAS
DE INFORMACION
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



ESTRATEGIA DE ALMACENAMIENTO DEDICADO DISTRIBUIDO

ADMINISTRADO POR UN SISTEMA DE IDENTIFICACION POR

RADIOFRECUENCIA (RFID)

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

POR:

ING. ERICK ULISES ESLAVA VENTURA

MONTERREY, N. L.

MAYO DE 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

ESCUELA DE INGENIERIA Y TECNOLOGIAS DE INFORMACION PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



ESTRATEGIA DE ALMACENAMIENTO DEDICADO DISTRIBUIDO ADMINISTRADO POR UN SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA (RFID)

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

POR:

ING. ERICK ULISES ESLAVA VENTURA

MONTERREY, N. L.

Mayo 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

ESCUELA DE INGENIERIA Y TECNOLOGIAS DE INFORMACION PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por el Ing. Erick Ulises Eslava Ventura sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

Comité de Tesis:

Dr. Jorge Limón Robles

Asesor

Dr. Neale Ricardo Smith Cornejo

Neale R. Smil

Sinodal

Dr. José Lois Gonzalez Velarde

Sinodal

Aprobado:

Dr. Neale Ricardo Smith Cornejo

Neal R. Smile

Director - Maestría en Ciencias con Especialidad en Sistemas

de Calidad y Productividad

ESTRATEGIA DE ALMACENAMIENTO DEDICADO DISTRIBUIDO ADMINISTRADO POR UN SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA (RFID)

POR:

ING. ERICK ULISES ESLAVA VENTURA

TESIS

PRESENTADA AL PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

ESTE TRABAJO ES REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMASDE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE MONTERREY

Dedicatoria

Mi tesis la dedico con todo mi cariño y respeto:

A mis padres Cosme Eslava y Victoria Ventura que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Los quiero con todo mi corazón y les dedico este presente trabajo como muestra de agradecimiento al apoyo que me han brindado para hacer realidad las oportunidades profesionales que se me han brindado.

A mis hermanos Ricardo y Victor que siempre me han apoyado en cada una de mis metas.

A toda mi familia la cual quiero mucho y me han brindado su cariño incondicional.



Agradecimientos

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis padres y hermanos que con su cariño y apoyo que me han dado he logrado alcanzar una meta más en mi vida. Su presencia estará siempre presente en mi persona.

A mi asesor el Dr. Jorge Limón, por todo el apoyo brindado y la confianza que tuvo en mí durante el desarrollo de esta tesis, por compartir conmigo sus valiosas experiencias y conocimientos, pero sobretodo por ser un ejemplo a seguir.

A toda mi familia y a mis amigos que con su apoyo moral me motivaron a seguir adelante y hacen posible que alcance cada vez más retos.

A mis maestros, gracias por sus enseñanzas, sus conocimientos, experiencias y sabios consejos que compartieron durante mi maestría.

GRACIAS



Índice General

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE GENERAL	6
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.3 OBJETIVOS	16
1.4 ALCANCE Y SUPUESTOS DEL ESTUDIO	16
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.7 CONTENIDO DEL PRESENTE DOCUMENTO	20
CAPITULO 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA	21
2.1 Inventarios	21
2.2 INTRODUCCIÓN A LOS ALMACENES	30
2.3 PROCESOS DENTRO DE UN ALMACÉN	32
2.4 TIPOS DE ALMACENES	37
2.5 DISEÑO DE UN ALMACÉN	38
2.6 TIPOS DE CONFIGURACIONES PARA ALMACÉN (LAYOUT).	39
2.7 ESTRATEGIAS DE ALMACENAMIENTO	46
2.8 IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA (RFID)	56
CAPITULO 3 METODOLOGÍA PROPUESTA	62
3.1 Introducción	62
3.2 EL SISTEMA BAJO ESTUDIO	64
El almacén y los productos	64
El Sistema de administración de inventarios	64
3.3 EL SISTEMA RFID PROPUESTO	65
3.4 NÚMERO ESPERADO DE VIAJES POR CADA UBICACIÓN D	E UN SKU69
3.5 ALMACENAMIENTO DEDICADO DISTRIBUIDO	



CAPITUL	.O 4 EVALUACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO	75
4.1 P	PARÁMETROS DE ENTRADA	75
4.2	Revisión Periódica	76
4.3	CONFIGURACIONES DEL LAY OUT Y CÁLCULO DE DISTANCIAS	78
4.4	CONSIDERACIONES GENERALES	79
4.5	CÁLCULO DE DISTANCIAS	80
4.6	ESTRATEGIA DE ALMACENAMIENTO	84
4.7	GENERACIÓN DE ÓRDENES DEL CLIENTE	86
4.8	SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ALMACÉN E INVENTARIOS	86
CAPITUL	LO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOSERROR! BOOKMAF	RK NOT DEFINED
5.1	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	90
CONCLU	ISIONES	97
Inves	TIGACIONES FUTURAS	100
REFEREN	NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	S	106
Сомр	PORTAMIENTO DEL INVENTARIO DE CADA PRODUCTO	106
	GURACIONES DE ALMACÉN UTILIZADAS Y DISTANCIA POR CELDA	



Índice de Tablas

Tabla 1. Costos operativos dentro de un almacén	18
Tabla 2. Distribución del tiempo de surtido en un almacén	18
Tabla 3 Asignación de ubicaciones de una estrategia dedicada distribuida	74
Tabla 4. Demandas y tiempos de resurtido de los 15 productos	75
Tabla 5. Parámetros de entrada	76
Tabla 6. Datos de cada producto	91
Tabla 7. Revisión periódica por producto	91
Tabla 8. Resultados en administración de inventarios	92
Tabla 9. Ahorros de distancias Layout un solo pasillo	93
Tabla 10 Ahorros de distancias Layout pasillos verticales	93
Tabla 11 Ahorros de distancias Layout pasillos horizontales	93
Tabla 12 Ahorros de distancias Layout pasillos angulados	93
Tabla 13 Ahorros del almacenamiento dedicado vs aleatorio ubicación más cer	cana. 94
Tabla 14 Ahorros del almacenamiento dedicado vs aleatorio ubicación más cer	<i>cana</i> . 95
Tabla 15 60% de la demanda concentrada en el 20% de los productos	96
Tabla 16 80% de la demanda concentrada en el 20% de los productos	96



Índice de Figuras

Figura	1.	Inventario con revisión continua	. 27
Figura	2.	Inventario con revisión periódica	29
Figura	3.	Funciones de un almacén. Tomada de Rowenhorst et al, 2000	33
		Acomodo vertical de un almacén	
		Puertas de entrada y salida ubicada en extremos opuestos	
Figura	6.	Puertas de entrada y salida ubicadas en el mismo lado	43
Figura	7.	Diseño de ubicaciones óptimas (Koster & Roodbergen, 2008)	43
Figura	8.	Diseño de ubicaciones óptimas (Koster & Roodbergen, 2008)	44
Figura	9.	Configuración con Pasillo central	45
Figura	10.	Almacén con Pasillos angulados	45
Figura	11.	RFID en un almacén (Chow et al, 2006)	60
Figura	12.	Proceso de almacenamiento con RFID	65
Figura	13.	Almacén con productos asignados de manera distribuida	68
		Número esperado de viajes	
Figura	15.	Grafica del número de viajes por producto	73
Figura	16.	Probabilidad de desabasto óptima	77
Figura	17	Almacén único Pasillo Figura 18 Almacén Pasillos horizontales	78
Figura	19.	Almacén Pasillos verticales Figura 20. Almacén pasillos angulados	79
Figura	21.	Tarima estándar	80
Figura	22.	. Pasillos en almacenes verticales y horizontales	81
Figura	23.	. Celdas por pasillo	82
Figura	24.	. Distancia de un pasillo a otro	83
Figura	25.	. Diagrama del modelo de simulación	89



Resumen

La presente tesis describe uno de los problemas más comunes que se tienen al administrar un almacén, el cual consiste en decidir qué estrategia utilizar para almacenar y recolectar los productos que necesiten tener un inventario dentro del almacén. Para abordar adecuadamente el problema, el presente trabajo contiene una investigación del estado del arte que nos permitan tener una base sobre las diferentes estrategias de almacenamiento y sobre los factores que pueden intervenir en la selección de una adecuada estrategia.

Se desarrollará un primer enfoque referente a una administración de inventarios por revisión periódica, la cual nos permitirá obtener los niveles óptimos de inventario a almacenar, así como los tiempos de revisión para los productos. Después de definir las cantidades a almacenar se hace una investigación de los tipos de layout para un almacén para poder obtener el número de ubicaciones de almacenaje disponibles, así como las distancias. Esto nos permitirá obtener las distancias totales de recorrido que se ocuparían para almacenar y recolectar productos desde y hacia las ubicaciones asignadas.

Como resultado de la investigación, fue propuesta una estrategia de almacenamiento dedicado distribuido, la cual permite obtener ahorros en cuanto a las distancias totales de recorrido dentro de un almacén. Para validar dicha estrategia fue desarrollado un modelo de simulación que permitió comparar las distintas estrategias encontradas en la literatura.

Esta estrategia de almacenamiento permite que los productos se almacenen de manera distribuida dentro del almacén. La facilidad de administrar este tipo de estrategias, se hace posible gracias al modelo propuesto de identificación por radiofrecuencia RFID, el cual permite aprovechar los beneficios de esta estrategia y permite un mayor control en la administración de un almacén.



Capitulo 1 Introducción

1.1 Introducción

Actualmente el uso de los almacenes juega un importante papel en la industria. A pesar de que abrir un almacén requiere infraestructura, equipo, terreno, empleados, sistemas de información, es decir, una inversión que sería significativa para una empresa (Bartholdi y Hackman, 2011), existen razones puramente financieras que dan sentido al uso de almacenes por parte de una empresa. Puede salir más rentable realizar abastecimiento en grandes cantidades para reducir los precios, a pesar de necesitar mayor espacio para su almacenamiento o realizar movimiento de materiales en grandes cantidades (Heizer & Render, 1997).

Entre las principales ventajas que pueden existir para tener un almacén, es para hacer un mejor equilibrio de la oferta y la demanda del cliente en el momento en que sea necesario, para consolidar un producto, etiquetar o reempacar algún producto, aprovechar economías de escala, o estar preparado ante alguna contingencia; estas actividades superan los costos y desventajas de no contar con un almacén (Bartholdi y Hackman, 2011).

Para maximizar sus beneficios es necesaria una correcta administración del almacén. De acuerdo a Bartholdi y Hackman (2011), administrar un almacén significa usar eficientemente el espacio y la mano de obra. Ambas son costosas y es deseable que el almacén cumpla su función de entregar adecuadamente los productos al cliente con el mínimo posible de estos recursos. Los procesos de almacenamiento y recolección son muy importantes porque consumen la mayor parte del costo de la mano de obra y determinan el tiempo de respuesta experimentado por los clientes inmediatos.



El personal debe desplazarse grandes distancias hacia y desde la ubicación del producto por cada proceso de almacenamiento y recolección. Las rutas son diferentes para cada orden y la distancia total recorrida dependerá de la mezcla de demandas de los diferentes productos y de la ubicación de estos en el almacén. El reto es reducir la distancia de recorrido encontrando formas eficientes de localizar los productos en el almacén (Bartholdi y Hackman, 2011).

En la literatura se han propuesto diversas técnicas de ubicación de los productos en el almacén para minimizar las distancias y tiempos de traslado de los productos hacia y desde su ubicación, almacenando los productos de mayor demanda de viajes en las posiciones más cercanas.

Las estrategias más referenciadas para el almacenamiento de los productos, son el **almacenamiento dedicado**, y el **almacenamiento aleatorio**. Aunque existen diversas estrategias en la literatura, la gran mayoría resultan ser variantes de estas dos (Pohl et al, 2010).

La estrategia de almacenamiento más utilizada, es la de almacenamiento dedicado, el cual requiere asignar una sola ubicación para cada SKU (unidad de mantenimiento de inventario por su siglas en ingles), en la cual solo este SKU puede ser almacenado (Pohl, & Meller, 2009). Si por su volumen el SKU requiere de varias ubicaciones, estas son seleccionadas de forma que se encuentren concentradas. Esta permite un mayor control visual de lo que hay en el almacén, es sencilla de aplicar, y permite que el almacenista se aprenda las ubicaciones de los productos en base a experiencia. Existen en la literatura estrategias para asignar las ubicaciones a los SKU's de forma que se minimicen los recorridos. La más común consiste en asignar las ubicaciones de menor recorrido a los SKU's de mayor demanda de viajes por ubicación por periodo.

Existe otra técnica en la literatura conocida como almacenamiento aleatorio, la cual se basa en colocar el producto en las ubicaciones más cercanas de un almacén que estén disponibles al momento que el producto llega (Pohl, & Meller, 2009).



Bajo ciertas circunstancias puede permitir una mejor utilización del espacio y de la mano de obra ya que no obliga a mantener una ubicación desocupada para un SKU del cual no se tiene existencia y dando un mayor uso a las celdas de menor recorrido, sin embargo dado que la asignación es aleatoria el beneficio real depende del orden en que lleguen. Por otro lado, es más complicada de administrar ya que como la distribución es cambiante, los almacenistas no podrían aprenderse las ubicaciones de los SKU's. Además como rompe la limitante de mantener los productos concentrados -los SKU's estarán almacenados en forma distribuida- no hay un control visual de lo que se tiene en el almacén.

En los últimos años han surgido diversas tecnologías que tienen el potencial para transformar la administración de los almacenes. Una de las más relevantes es sin duda la tecnología RFID (Identificación por radiofrecuencia).

Esta tecnología permite adherir una etiqueta inteligente (tag) en los productos a almacenar (puede ser a nivel de producto, caja o tarima). Las etiquetas tienen la capacidad de comunicarse en forma automática con una red de lectores RFID estratégicamente ubicados, los cuales registran el paso de cada producto etiquetado cuando estos entran dentro de la zona de alcance de cada lector. La información es enviada por los lectores y almacenada en un servidor central el cual puede ser accesado en cualquier momento por el usuario vía remota permitiéndole obtener información en tiempo real de las existencias y ubicaciones de los productos dentro del almacén, o mejor aún dentro de toda la cadena de suministros (Miles & Williams, 2008; Jabjiniak y Gilbert 2004). Esta información también puede ser usada por sistemas de almacenamiento, ruteo y administración de inventarios que en forma automática toman decisiones con base en la información del sistema y en el producto específico que se está manejando en ese momento.

Los beneficios que se pueden obtener al usar esta tecnología son significativos. Actualmente sus costos han ido disminuyendo y la tecnología se ha ido adecuando a las necesidades de las empresas haciendo cada vez más accesible su utilización a gran escala para las empresas lo cual abre una nueva oportunidad en el mercado (Miles & Williams, 2008).



En la presente tesis se ha identificado una oportunidad importante de optimización de la ubicación de los productos en almacenes que surge de la suposición de existencia de la tecnología RFID. Líneas arriba comentamos que para reducir los tiempos de almacenamiento y recolección de los productos en los almacenes se han propuesto en la literatura diversas técnicas de ubicación de los productos en el almacén que permiten minimizar las distancias y tiempos de traslado de los productos hacia y desde su ubicación asignando a los productos de mayor demanda de viajes en las posiciones más cercanas.

Un elemento común a la mayoría de las técnicas de asignación dedicada publicadas es que asume que los productos del mismo tipo deben de estar colocados en ubicaciones adyacentes del almacén (le llamaremos ubicación dedicada concentrada) para facilitar el proceso de identificación de la ubicación de un producto así como del control visual del inventario.

Estas restricciones son válidas cuando no existe tecnología RFID ya que el recolector tiene la necesidad de recordar la ubicación del producto y debe de ser capaz de identificar visualmente la existencia del mismo, pero dejan de ser una necesidad cuando se cuenta con RFID en el cual la ubicación real de los productos y la cantidad de inventario se puede llevar en forma precisa por medios automáticos. Esto permite generar en forma automática la ruta de recolección más corta y comunicarla por medios inalámbricos al recolector, justo en el momento de su ejecución, para que vaya al lugar correcto a recoger el producto.

Eliminar estas restricciones permite ahora el ubicar un mismo producto en diferentes ubicaciones del almacén (le llamaremos ubicación dedicada distribuida). La pregunta de fondo es, ¿permite el uso de ubicación distribuida oportunidades nuevas de optimización de los tiempos de recolección?, de ser así, ¿Qué métodos de ubicación distribuida se deberían de utilizar?, ¿Cómo es el desempeño con estos métodos, comparado con los métodos tradicionales de ubicación dedicada concentrada? ¿Y con los de ubicación aleatoria? El objetivo de la presente tesis es responder a estas preguntas.



Por representar un primer enfoque a este problema nos concentraremos en responder a estas preguntas para un almacén de cargas unitarias que opera bajo un sistema de administración de inventarios por revisión periódica.

1.2 Planteamiento del problema

Como se mencionó anteriormente se desea explorar las oportunidades de mejora que ofrece una estrategia de ubicación dedicada distribuida de SKU's en un almacén sobre la ubicación dedicada concentrada y la ubicación aleatoria en un almacén. Para la presente tesis nos restringiremos al caso de un almacén de cargas unitarias donde la administración de inventarios se lleva por el método de revisión periódica.

A continuación describiremos el almacén bajo estudio.

Considere un almacén con las siguientes características:

- El almacenamiento y recolección se hacen siempre en tarimas completas (almacén de cargas unitarias)
- La capacidad de almacenaje está determinada por un número n de ubicaciones disponibles (celdas) en cada una de las cuales se puede ubicar hasta un determinado número CAP de tarimas del mismo producto.
- Para cada ubicación i se conoce la distancia total Di a recorrer durante el proceso de almacenaje y recolección de un producto en la celda i.
- El almacén procesa m SKU's diferentes.
- Se usa una estrategia de administración de inventarios por revisión periódica.



 Para cada SKU j se conoce la demanda semanal del producto DemSKUj, el tiempo de resurtido TEj, así como la información necesaria para estimar los valores óptimos de periodo de revisión de inventario Rj
 y valor óptimo del nivel de inventario en pedido máximo Sj.

Las preguntas a investigar son:

Asumiendo que se usa una estrategia de ubicación dedicada de SKU's que permita localizar a un mismo SKU en diferentes celdas no adyacentes (Ubicación Dedicada Distribuida).

- ¿Cómo se deben de asignar los diferentes SKU's a las diferentes ubicaciones dentro del almacén para minimizar el tiempo de traslado total por periodo?
- 2. ¿Es esta estrategia mejor que las estrategias tradicionales de ubicación dedicada concentrada y de ubicación aleatoria?, ¿Qué tanto mejor?

1.3 Objetivos

- Desarrollar una metodología para la ubicación dedicada distribuida de SKU's en un almacén de cargas unitarias que permita minimizar el tiempo de recorrido total por almacenaje y recolección
- Comparar el desempeño de la metodología propuesta contra las estrategias tradicionales de ubicación dedicada distribuida y ubicación aleatoria bajo diferentes configuraciones de celdas (layout's) en un almacén.

1.4 Alcance y Supuestos del estudio

Debido a la complejidad de este problema, en la presente tesis se acotará el estudio bajo los siguientes supuestos.



- 1. Es un almacén de cargas unitarias, es decir, el flujo de almacenamiento y recuperación de material es de una unidad (tarima) por viaje.
- 2. Sobre las ubicaciones disponibles en el almacén (celdas)
 - a. Todas las ubicaciones (celdas) son del mismo tamaño lo que permite asignar cualquier SKU a cualquier celda.
 - b. Cada celda permite guardar un número pre especificado de tarimas (capacidad de la celda).
 - c. En una ubicación solo se puede colocar un solo tipo de SKU para evitar manipulación excesiva del producto.
- 3. Se asume que la llegada de los pedidos de todos los SKU's siguen un proceso Poisson con demanda conocida.
- 4. Los productos no requieren seguir una disciplina FIFO (First Input-First output) en sus procesos de almacenamiento.

La validación de los beneficios del método propuesto se realizará mediante la simulación de un almacén de cargas unitarias con diferentes configuraciones de celdas (layouts). La medida de desempeño será la suma de las distancias totales de almacenamiento y recolección.

La simulación comprenderá una estrategia inicial en la cual se calcularán los niveles de inventario óptimos de cada SKU bajo el modelo de revisión de inventarios periódica. Se simulará la llegada de los pedidos, y la recolección y entrega de los mismos, así como las solicitudes de resurtido y la llegada y almacenamiento de nuevo material bajo cada una de las estrategias de ubicación de SKU's bajo análisis.

1.5 Justificación del problema

La existencia de un almacén para una empresa solo se puede justificar por los ahorros que genera y para que estos se puedan dar se deberá tener una buena administración del modo de operar.



El costo de tener un almacén puede llegar a alcanzar hasta un 30% de los costos de operación de una empresa (Hompel, 2007), por lo que se requiere un adecuada administración del mismo.

Bartholdi y Hackman (2011) afirman que dentro de las operaciones que se realizan en un almacén, el proceso de surtido de pedidos del cliente (order picking) puede alcanzar hasta el 55% de los costos operativos de un almacén.

Tabla 1. Costos operativos dentro de un almacén

Actividad 9	% Costos operativos
Surtido de ordenes	55%
Almacenamiento	15%
Recepción de produ	uctos 10%
Otros	20%

Así mismo, dentro de las operaciones de surtido de órdenes del cliente, el tiempo de recorrido durante los traslados de almacenamiento y recolección de productos (viajes de la puerta hacia y desde la ubicación del producto) pueden llegar a ocupar hasta el 55% del tiempo que se tarda en surtir un pedido (Bartholdi y Hackman, 2011) como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 2. Distribución del tiempo de surtido en un almacén

Actividad	% tiempo de surtido
Recorrido	55%
Busqueda	15%
Extracción	10%
Papeleo y otras actividades	20%

Bartholdi y Hackman, 2011

Es por esto que es muy importante tener una metodología que pueda reducir el tiempo de recorrido y hacer más eficiente estas actividades, ya que sería un ahorro muy significativo para cualquier empresa.



Este documento trata de buscar un modelo que permita reducir las distancias y tiempos de estas operaciones aprovechando las oportunidades que ofrece el uso de la tecnología de Radiofrecuencia.

1.6 Metodología de la investigación

La realización de este documento será una combinación de una investigación bibliográfica la cual sustentará y hará una recopilación del estado del arte, sobre estrategias existentes de optimización de tiempos y distancias de un almacén, así como una parte experimental, en el cual se pretende comprobar los beneficios del (los) método(s) propuesto(s) contra los métodos tradicionales para distintos tipos de almacenes.

Las actividades a seguir para llegar al objetivo planteado en este documento:

a) Investigación Bibliográfica

Investigar lo existente en la literatura sobre el tipo de almacenamiento dedicado y aleatorio, sus ventajas y desventajas y los casos en que conviene usar cada uno. Investigar si se ha propuesto algún otro modelo en la literatura que integre la identificación por Radiofrecuencia y/o la ubicación de productos dedicada distribuida.

b) Desarrollo de la propuesta preliminar

Proponer y desarrollar la metodología propuesta para la ubicación de SKU's bajo la estrategia de ubicación dedicada distribuida.

c) Validación y ajustes de la propuesta

- Desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos que permita evaluar el desempeño de cada estrategia bajo diferentes configuraciones de almacén
- Utilización del modelo de simulación para comparar el desempeño de las estrategias bajo análisis.
- III. Ajustes a la propuesta según se requiera.



d) Conclusiones y recomendaciones

Desarrollar y presentar las conclusiones sobe los resultados obtenidos y proponer las recomendaciones para investigaciones futuras.

1.7 Contenido del presente documento.

En el capítulo 1 se ha presentado una introducción al problema de investigación, sus objetivos, supuestos, alcance y justificación así como la metodología a seguir para el desarrollo del proyecto.

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico relacionado con el problema así como las soluciones previas.

En el capítulo 3 se presenta el método propuesto para asignar ubicaciones a SKU's en un almacén bajo la estrategia de ubicación dedicada distribuida.

En el capítulo 4 se describe la aplicación de simulación desarrollada para validar la metodología propuesta y analizar sus ventajas contra las estrategias tradicionales así como los resultados de la validación y análisis.

En el capítulo 5 se resumen las conclusiones que se desprenden del estudio así como las recomendaciones para investigaciones futuras.



Capitulo 2 Revisión de la Literatura

En una economía global, la administración de la cadena de suministro juega un importante papel en el flujo de bienes y servicios. Una cadena de suministro bien administrada entrega los productos correctos a los clientes, en el momento correcto y en la cantidad correcta. Para lograr este objetivo las cadenas de suministro incluyen comúnmente almacenes como puntos intermedios que permiten aprovechar las economías de escala en producción y transporte así como proveer respuesta rápida a los clientes en lugares distantes del punto de producción

2.1 Inventarios

La administración de inventarios años atrás era una cuestión relativamente simple. Los inventarios eran considerados como una medida de riqueza. La riqueza y el poder de un negocio eran evaluados en términos de la cantidad de productos guardados en almacenes (Silver, 1998). Silver (1998) define la administración de inventarios como la obtención, almacenamiento y mantenimiento de materiales, materia prima y productos terminados, logrando un menor costo, un abastecimiento eficiente referido a la cantidad, al menor tiempo y mejor calidad, de acuerdo a las necesidades y requerimientos del cliente o un consumidor final.

Para la mayoría de las empresas, quizá sus procesos no estén diseñados para responder de manera instantánea a los requerimientos del cliente, por lo que un adecuado nivel de inventarios podría suministrar una disponibilidad de que el producto o servicio pueda satisfacer las demandas del cliente, en muchos sectores del mercado, este inventario puede no solo mantener las ventas sino en algunos casos aumentarlas (Ballou, 2004).



Un ejemplo de este caso podría ser en una cadena de supermercado, en la cual teniendo siempre una disponibilidad de un producto básico, las personas pueden acudir a comprar ese producto y aprovechar para surtirse de otros productos que no son indispensables pero que les son necesarios en ese momento.

Ballou (2004) expone el concepto de inventarios como, "cualquier materia prima, trabajo en proceso o producto terminado, que aparece en diversos puntos del canal de producción y logística de una empresa".

Aunque mantener inventario tiene un costo asociado, muchas veces este costo es compensado, porque el uso de inventarios puede reducir los costos de operación y aprovechar las economías de escala, permitiendo periodos de producción más grandes, más largos y de mayor nivel (Bragg, 2004).

Existen diversas razones por las cuales los inventarios están presentes en una cadena de suministro. Dentro de las más importantes sobresalen: a) mejorar el servicio al cliente y b) reducir costos. Las cuales son 2 de las principales razones para reducir el inventario (Tersine, 2001).

Otro argumento a favor es que son útiles cuando se tiene mucha variabilidad en el tiempo que se necesita para producir y transportar bienes por todo el canal de suministros que pueden impactar en los costos de operación así como en los niveles de servicio al cliente.

Tener algún inventario en puntos clave por todo el canal de suministros permite al sistema seguir operando durante un tiempo, mientras se puede disminuir el efecto del impacto (Ballou, 2004).

Costos de mantener inventario

Tersine (2001), Ballou (2004) y Bragg, (2004) concuerdan que para determinar la política de inventarios son importantes tres clases generales de costos: costos de compra de productos, costos de manejo y costos por falta de existencias.



Los costos de compra o adquisición, indica el costo por unidad comprada si es obtenido por un recurso externo o el costo de producción por unidad si este es fabricado internamente (Tersine, 2001). El costo unitario siempre debe ser tomado como costo de mercancía en inventario, en el caso de productos comprados es el costo de la compra mas el costo de transporte al almacén, para artículos fabricados el costo incluye material directo, mano de obra directa y gastos generales de la fábrica (Silver 1998).

Ballou (2004) afirma que los costos de mantener inventario resultan de guardar, o mantener, artículos durante un periodo y son bastantes proporcionales a la cantidad promedio de artículos disponibles. Estos costos pueden ser considerados en cuatro clases: costos de espacio, costos de capital, costos de servicio de inventario y costos de riesgo de inventario.

Mientras que el costo por falta de existencias, Silver (1998) lo define como "aquella consecuencia económica de una escasez interna o externa a causa de la colocación de un pedido que no puede surtirse desde el inventario asignado". La escasez externa ocurre cuando la orden de un cliente no es suplida, y la interna cuando la orden de un grupo o departamento dentro de la organización no es llenada.

Objetivos del Inventario

Bragg (2004) resume que el objetivo principal del inventario, está dado en equilibrar la disponibilidad del producto en el momento y las cantidades deseadas, con los costos de suministrar un nivel determinado de disponibilidad del mismo.

Normalmente la disponibilidad de un producto se basa en la probabilidad de cumplimiento a partir del stock actual. Ballou, (2004) menciona que esta probabilidad también conocida como nivel de servicio puede definirse como:

$$NS = 1 - \frac{Num._unidades_agotadas_anualmente}{Demanda_anual_total}$$



En donde el nivel de servicio se expresa entonces como una tasa ponderada de surtido promedio (TPSP), la cual se obtiene multiplicando la frecuencia con la cual cada combinación de artículos aparece en el pedido con la probabilidad de surtir el pedido completo, dado el número de artículos del pedido (Ballou, 2004).

Estrategias de administración de inventarios

La administración de inventarios es parte clave en el manejo del almacén, debido a esto cuenta con los siguientes principios para lograr una gestión eficiente (Bragg, 2004):

- Determinar qué artículos hay que tener en el almacén y en qué cantidades.
- > Elegir el modo y los plazos de abastecimiento de producto.
- > Informar de todos los movimientos de entradas y salidas
- > Vigilar permanentemente el estado de los inventarios.
- > Elegir el tipo de inventario que se va a efectuar y sobre qué referencias.

Existen 2 estrategias utilizadas comúnmente para tener un mayor control sobre los inventarios, revisión periódica y revisión continua (Tersine, 2004). Analicemos cada una de estas dos estrategias de revisión y veamos sus ventajas y desventajas.

Revisión Continua

Para este modelo de revisión nos enfocaremos en 2 parámetros los cuales nos ayudaran a definir un mejor control sobre nuestros inventarios, los cuales son la Cantidad Económica de Pedido (EOQ), y el Punto de Reorden (PRO). Básicamente estos responden a 2 de las preguntas más importantes que uno se puede hacer cuando realiza una política de inventarios, que son, ¿En qué cantidades pedir? Y ¿Cuándo pedir?



Chopra (2003) define a la cantidad económica de pedido (EOQ, por sus siglas en ingles) como un parámetro que define cual es la cantidad óptima que se debe pedir, para no caer en costos excesivos de inventario y poder asegurar el cumplimiento de los clientes, en la mayoría de los casos mientras la demanda se mantenga estable.

Ballou (2004) fundamenta la siguiente fórmula, bajo los supuestos de que la demanda es conocida, y que las variaciones no son significativas a través del tiempo, también toma en cuenta el costo de manejar inventarios, así como el costo de ordenar o de pedido. Veamos la fórmula para tener una idea más clara de este concepto.

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{iC}}$$

Donde S es el costo de colocar el pedido, ó de ordenar, sin importar la cantidad de piezas que necesiten ser pedidas al proveedor, mientras que D es la demanda promedio que se pronostica para ese producto en específico, la cual puede obtenerse en base a un historial de la empresa. La i y la C forman el costo de mantener una unidad de inventario durante un periodo (usualmente un año), mientras que la C es el costo que se tiene de cada pieza, la i representa la tasa de interés que tiene la empresa para el manejo de inventarios. Esta tasa incluye costos tanto de mano de obra, espacio, pérdidas ya sean por caducidad, obsolescencia o daños en el material, etc. (Ballou, 2004).

El otro parámetro a analizar es el Punto de Reorden (PRO), el cual Choppra (2004) define como "la cantidad mínima de inventario que se debe tener antes de mandar a pedir un reabastecimiento, con el fin de satisfacer las necesidades de los clientes".

Por lo tanto cuando el inventario efectivo (Inventario en tránsito + Inventario físico - Inventario comprometido), alcance el punto de reorden se procede a solicitar una nueva orden de reabastecimiento. En este caso el PRO se define como (Ballou, 2004):

$$PRO = D * L$$



Este parámetro depende principalmente de la demanda D durante un periodo, y el tiempo de entrega promedio o resurtido L por parte del proveedor en unidades de tiempo. En muchas ocasiones cuando la demanda no sigue un comportamiento uniforme, es decir que sea constante y continua, la mayoría de las veces es incierta y está calculada en base un pronóstico, mediante una distribución generalmente del tipo normal, se hace un ajuste dependiendo de una probabilidad (z) de tener existencias durante el tiempo de entrega y de un error de pronóstico o desviación estándar (σd) a manera de que nos sirva como un inventario de seguridad para el periodo mientras pedimos y llega el producto (Sven, 2006).

$$PRO = D * L + z(\sigma_d \sqrt{L})$$

Para emplear estos conceptos se debe tener en cuenta las condiciones necesarias y las suposiciones de la situación analizada (Tersine, 2001):

- ✓ La tasa de la demanda es conocida, y continúa.
- ✓ Los tiempos de entrega son conocidos y constantes.
- ✓ Los tamaños de lote son situados en el inventario al mismo tiempo.
- ✓ La escasez de existencias no está permitida y pude ser evitada, desde que la demanda y los tiempos de entrega sean conocidos.
- ✓ Los costos son fijos, ordenes, alistamiento etc.
- ✓ Hay suficiente espacio, capacidad deseada y capital para conseguir la cantidad deseada.
- ✓ El producto es único, y no hay interacción con ningún otro tipo de inventario. No existe la unión de órdenes.

Se corren riesgos de desabasto de inventario, sin embargo estos solo se dan en el tiempo en que se pidió un reabastecimiento y hasta que llega, aunque estos riesgos pueden controlarse ajustando el EOQ y el punto de reorden, así como asignando un inventario de seguridad que permita tener un soporte extra para seguir cumpliendo los requerimientos de los clientes (Bragg, 2004; Ballou, 2004).



Revisemos la grafica del comportamiento del inventario Figura 2.1 que está siendo administrado por una revisión continúa. Se puede observar cómo va disminuyendo el inventario.

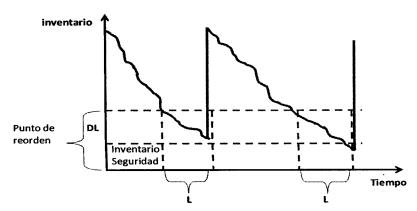


Figura 1. Inventario con revisión continua

Ahora bien veamos los costos que están implícitos en una modelo de administración de inventarios por revisión continua, Ballou (2004) menciona que pueden ser calculados de la siguiente manera y está dada por la fórmula:

$$CT = D * C + \frac{D}{Q}S + iC\frac{Q}{2}$$

En donde D*C es el costo de todas las unidades de producto durante el periodo que abarque la demanda D, DS/Q, representa el número de veces que se reabastecerá en un determinado periodo por el costo que implica ordenar o hacer una requisición, mientras que iCQ/2, es el costo de mantener un inventario promedio en el almacén (Ballou, 2004).

Revisión Periódica

Otra estrategia de administración de inventarios es la de revisión periódica. Este modelo de control de inventarios consiste básicamente en pedir una cantidad variable de unidades de inventario en un periodo determinado y conocido. Es decir, está basado en revisiones de inventario por periodos en lugar de cantidades.



Se alcanza un nivel máximo de inventario, basado en el uso de la demanda durante un periodo y el tiempo de entrega. Es inventario es lo máximo que se tendrá en el almacén mientras se realiza un pedido, generalmente pocas veces se tendrá completo este nivel de inventario ya que irá disminuyendo debido a la demanda desde que se pide hasta que se entrega el producto (Ballou, 2004).

Por lo tanto, Sven (2006) y Tersine (2001) concuerdan con que el tamaño de la orden está dado por la diferencia del inventario actual al momento de realizar el pedido y el nivel de inventario máximo. Debido a esto este modelo de revisión de inventarios cuenta con 2 parámetros a analizar.

- 1. Nivel máximo de inventario (M)
- 2. Periodo de revisión fija (R)

Para utilizar la revisión periódica, se obtiene primero el cálculo de EOQ, de la misma manera que si fuera una revisión continua, esto es solo para definir cuáles serán nuestros periodos de revisión o dicho de otra manera el tiempo promedio entre periodos, este intervalo de revisión Ballou (2004) lo calcula como:

$$R = Q / D$$

En donde Q es el tamaño óptimo de pedido, dada una demanda constante por periodo D. Esto es porque queremos que en promedio el Tamaño de pedido sea Q unidades.

El tiempo entre pedidos R no siempre es un número entero, y aún y cuando así fuera, la ventaja de este modelo radica en que se puede ajustar según convenga, es decir, comúnmente se redondea a semanas, meses, o cualquier periodo que se ajuste a las requerimientos de la empresa, con el fin de que ese periodo sea fijo y siempre sea el mismo día, con lo cual ya no se tendría que monitorear continuamente (Sven, 2006).

Una ventaja importante de mencionar de este modelo de inventarios está en el tiempo entre pedidos R, ya que se pueden tomar en cuenta los tiempos de muchos productos de un mismo proveedor, lo que permite una buena sincronización de los envíos de tal manera que el mismo día se puedan surtir diferentes productos (Bragg, 2004; Sven, 2006).



El otro parámetro a calcular es el nivel máximo de inventario (M), el cual toma en cuenta la demanda D, el tiempo de entrega L, y el tiempo entre pedidos R, así como también se agrega un inventario de seguridad obtenido por la probabilidad de que existen unidades en inventario (z) y el error del pronostico o desviación estándar, para cubrir la variabilidad de la demanda y el tiempo de entrega. Este nivel de inventario esta dado por (Sven, 2006):

$$M^* = D(R+L) + z(\sigma_D \sqrt{R+L})$$

Ahora bien revisemos la grafica del comportamiento de inventario dado una estrategia de revisión periódica.

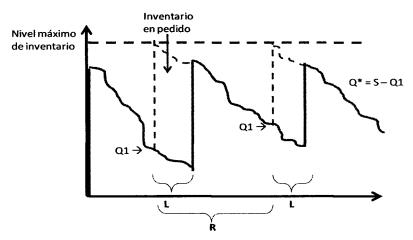


Figura 2. Inventario con revisión periódica

Si bien es cierto cada modelo tiene sus ventajas y desventajas, las cuales nos mencionan Ballou (2004), Chopra (2003) y Sven (2006):

- A diferencia de la periódica, la revisión continua debe de estar monitoreando el valor del nivel de inventario continuamente, mientras que la periódica solo se revisa a principios de cada periodo.
- También en la revisión continua causa que los tiempos de resurtido no sean regulares (a veces más largos y a veces más cortos) con lo cual no se pueden sincronizar los envíos con otros productos lo que dificulta su planeación.



- Generalmente en la revisión periódica siempre se pide el mismo día, evitando confusiones y facilitando la operación.
- ➢ En la revisión periódica se pueden tomar en cuenta diferentes productos, haciendo que el tiempo entre pedidos pueda ajustarse para que eventualmente varios productos sean pedidos el mismo día, facilitando su planificación.
- En la revisión continua, se tiene un nivel de inventario más bajo, y por consiguiente el Costo de mantener inventario es menor.
- ➤ La diferencia principal radica en que aun cuando el Costo de mantener inventarios es menor en una revisión continua, en la revisión periódica se logran costos globales, ya que permite una mejor consolidación de productos, ahorros en transporte, así como ahorros logísticos y administrativos.

2.2 Introducción a los almacenes

A lo largo de los años cada empresa ha buscado ofrecer los mejores productos minimizando los costos sin descuidar el servicio al cliente, antes esto no era tan difícil, puesto que los clientes estaban dispuestos a esperar largos tiempos de espera ya que no había muchos proveedores que cumplieran la demanda (Silver, 1998).

Gu et al, (2010) mencionan que actualmente las condiciones de los mercados se encuentran en un cambio constante y lo hacen de manera rápido, debido a diferentes factores, como el incremento de la competencia, tanto interna como externa, la globalización, así como el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten hacer más eficientes los procesos, por lo cual los clientes pueden recurrir a más posibilidades para poder satisfacer sus requerimientos, por lo que pocas empresas se pueden dar el lujo de hacer esperar a un cliente si no se tiene producto disponible en ese momento.



Esta es una de las razones por la cual sin importar que tipo de empresa manufacturera sea, se puede recomendar contar con un almacén. Sin embargo la decisión va más allá de si considerar tener un almacén o no, sino de saber qué producto se va almacenar, en que cantidades y en donde se deberá almacenarlo, para poder administrarlo de la forma más eficientemente posible (Hassam, 2002).

Thompkins (2007) define el almacenamiento como la parte de la logística que tiene como función proveer el espacio adecuado para el alojamiento seguro y ordenado de los bienes a través de un sistema para coordinar económicamente las actividades, instalaciones y mano de obra necesarias para el control total de la operación.

Bartholdi & Hackman (2010), nos mencionan diferentes actividades o funciones que se realizan dentro de un almacén, lo que lo hace una parte importante dentro de la cadena de suministros, desde que se compra la materia prima hasta que se entrega al cliente.

Las funciones principales de un almacén son (Bartholdi & Hackman, 2010):

- Debido a que la demanda está siempre en cambio continuo, el almacén sirve para hace un mejor equilibrio de la oferta y la demanda del cliente.
- Para consolidar un producto ya que reduce los costos de transportación y provee un mejor servicio.
- Para realizar procesos sencillos que pueden agregar valor, como ensambles sencillos, también llamados de postergación, ó etiquetar productos.
- > Aprovechar economías de escala



Koster et al, (2008) concuerdan en que la adopción de filosofías de administración tales como Justo a tiempo (JIT), o manufactura esbelta, traen nuevos retos para los sistemas de almacenamiento, incluyendo un control de inventarios más estrictos, tiempos de respuesta más cortos y una mayor variedad de productos.

Por otro lado el constante desarrollo de las Tecnologías de Información, tales como códigos de barras, identificación por radiofrecuencia (RFID) y sistemas de administración de almacenes (WMS), proveen nuevas oportunidades para mejorar las operaciones de los almacenes (Alcerreca, 2007). Estas oportunidades pueden incluir pero no están limitadas al control real de inventarios dentro de un almacén, fácil comunicación con otras partes de la cadena de suministro, y altos niveles de automatización (Davis & Luehlfing, 2004).

2.3 Procesos dentro de un almacén

Un almacén debe de funcionar de forma eficiente, de tal manera que pueda cumplir con las órdenes de requerimientos de sus clientes, para esto, se debe de considerar una serie de criterios que están implícitos en el manejo de un almacén para poder cubrir estos requerimientos (Hassan, 2002). Recursos como espacio, mano de obra y equipo necesario para realizar las diferentes funciones que se llevan a cabo en un almacén, que en conjunto con sistemas de información puedan hacer eficiente la operación de un almacén. (Rouwenhorst et al, 2000)

Bartholdi y Hackman (2010) aseguran que el proceso de almacenar y recolectar, ocupan la mayor parte de los recursos de mano de obra en la mayoría de los almacenes, es por eso que un buen almacenamiento puede reducir significativamente las distancias y tiempos en cada viaje dentro del almacén.



La siguiente figura Rouwenhorst et al, (2009) nos muestra las actividades y funciones a realizar dentro de un almacén para asegurar un buen funcionamiento.

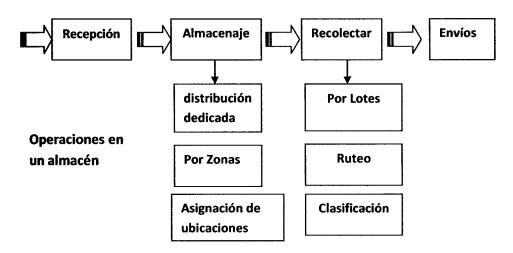


Figura 3. Funciones de un almacén. Tomada de Rowenhorst et al, 2000

Recepción de material

Este proceso de recepción puede empezar con una anticipada notificación de llegada de los productos, lo cual permite que los almacenes tengan tiempo para programar y coordinar eficientemente sus diferentes actividades dentro de un almacén (Gu et al, 2007).

Una vez que el producto ha llegado, se prepara su registro y es separado para su inspección y notar si tiene algún defecto, tal como algún daño, cantidades incorrectas, problemas en especificaciones etc., poder después si cumple con todos los requerimientos poder darle entrada al almacén (Bartholdi & Hackman, 2011).

En muchos de los almacenes, el material se recibe en tarimas, por lo cual tienen que ser separadas en cajas más pequeñas para poder almacenarlo de acuerdo a la distribución del almacén, lo que hace que en ocasiones este proceso consuma muchos recursos en la administración de un almacén (Bartholdi & Hackman, 2011).



Considerando todo el proceso de recepción de material, en promedio está estimado en un 10% en los costos operativos en un típico centro de distribución (Frazelle, 2002).

Frazelle, (2002) y Gu et al (2007), mencionan las decisiones básicas que se deben tomar en este proceso dependen de cierta información necesaria que puede ser descrita como:

- 1. Información acerca de las llegadas, tiempos, contenidos y cantidades de cada producto.
- 2. Información acerca de las demandas de los clientes, para conocer la rotación de los inventarios.
- Información acerca de la distribución del lay out, para decisiones de donde colocar las puertas de recepción de material, así como espacios para almacenar el producto entrante.
- 4. Recursos disponibles para el manejo de material

Almacenaje

Esta es la principal función de un almacén, la cual según Thompkins (2007) y Gu et al (2010), depende de tres fundamentales decisiones que se deben contemplar:

- a) ¿Cuales SKU's se deben almacenar y en qué cantidades?
- b) ¿Qué tan frecuentemente se debe pedir y cuál es el tiempo de respuesta?
- c) ¿Dónde debe ser almacenado el SKU para ser distribuido en el almacén?

Las primeras 2 pueden ser determinadas de acuerdo a las estrategias o políticas de inventarios que haya adoptado la empresa, de acuerdo a las características del producto o costos del mismo, así como del nivel de surtido que se le espera dar al cliente (Gu et al, 2010).



La última pregunta es fundamental para todos los almacenes, ya que los costos más altos en la administración de un almacén se deben por las actividades de almacenamiento y recolección de materiales, por lo que una correcta ubicación podría generar unos ahorros significativos a la empresa (Chao et al, 2009).

Antes de almacenar un producto, la primera decisión a tomar es donde ubicarlo, como se mencionó anteriormente esta actividad es muy importante, ya que determina, el tiempo, la distancia y el costo que tomará después para recolectarlo para un cliente (Chao et al, 2009).

Para poder hacer esto correctamente Bartholdi & Hackman (2011), mencionan que se requiere la administración de un segundo inventario, es decir conocer perfectamente cuál es la distribución del almacén, y las capacidades de almacenamiento de cada área, así como poder saber en todo momento cuales son las ubicaciones disponibles que podrían ser asignadas a un determinado SKU.

Este proceso utiliza una gran cantidad de recursos dentro del almacén ya que el material puede ser movido distancias muy largas desde el área de recepción hasta su ubicación asignada; y afirma que típicamente este proceso comprende un 10% a 15% de los costos operativos dentro de un almacén (Frazelle, 2002; Bartholdi & Hackman 2011).

De acuerdo a Gu et al (2007), la información necesaria para este proceso de almacenaje depende de:

- a) Información del área de almacenamiento, incluyendo configuración física del almacén lay out de las ubicaciones de almacenaje.
- b) Información de las ubicaciones de almacenaje, tal como su disponibilidad, dimensiones físicas y localización.
- c) Información del conjunto de SKU's a almacenar, dimensiones físicas, demandas, cantidades, así como los tiempos estimados de llegadas y salidas del almacén.



En este proceso se han estudiado y puesto en práctica diferentes estrategias que permiten lograr una mayor eficiencia en la asignación de ubicaciones para cada SKU, más adelante se analizarán las más comunes y puntualizarán los beneficios y ventajas de cada una de ellas.

Este problema de ubicación de productos se le conoce como Problema de asignación de ubicaciones para almacenaje ó SLAP por sus siglas en ingles (Storage location assignment problem), el cual es acomodar el producto en las ubicaciones más convenientes (Chao, et al., 2009).

Recolección ó extracción

El proceso puede comenzar como una orden de pedido del cliente, en la que cada entrada de la lista es definida como una *línea de pedido* (Bartholdi & Hackman, 2011), las cuales típicamente consisten en la cantidad requerida de un determinado producto. Se revisa la disponibilidad del producto en el almacén por medio de un sistema de administración de almacenes (WMS), que a su vez puede indicar la ubicación del material para su fácil acceso.

Bartholdi & Hackman, (2011) concluye que este proceso junto con el almacenaje representa el 55% de los costos operativos de un almacén, es uno de los procesos con más áreas de oportunidad, y en donde una gran variedad de estudios se han enfocado para optimizar este proceso, sobre todo en lo que respecta a las distancias recorridas, ya que el 55% de esta actividad se consume por las distancias que tiene que recorrer el almacenista entre un producto y otro para consolidar el pedido del cliente.

Diferentes métodos de recolección pueden ser utilizados dentro de un almacén, de los cuales según (Rowenhorst et al, 2000), cada método consiste en poco o mucho de los siguientes pasos básicos: Procesamiento por lotes, ruteo y secuencia de los productos y clasificación.



Envíos

Bartholdi & Hackman, (2011) afirman que este proceso consume muy pocos recursos tanto equipo como mano de obra de un almacén, ya que en la mayoría de los casos el producto ya fue consolidado para su envío, por lo cual ya está esperando en la zona de envíos, para su traslado, realizando las registros internos correspondientes para darle salida al material.

La información requerida para los envíos es similar a la de la recepción de materiales (Gu et al, 2007),

- 1. Información de pedidos entrantes.
- 2. Demandas, ordenes de pedido de los clientes y fechas de entrega.
- 3. Información acerca del lay out y recursos disponibles para el manejo de materiales.

2.4 Tipos de almacenes

Existen diferentes tipos de almacenes, los cuales son categorizados por su función primaria, la cual es definida por el tipo de servicio que les brindan a sus clientes (Bartholdi & Hackman, 2011):

- Centro de distribución minorista: un ejemplo son las cadenas de supermercados y tiendas de conveniencia, el cual este tipo se caracteriza por manejar un alto volumen y una gran variedad de productos, además de poder hacer cambios de productos frecuentemente.
- 2. Centro de distribución de refacciones: Este tipo de almacenes son los más difíciles de operar, ya que se manejan grandes cantidades de inventarios de una gran variedad de productos. En ocasiones algunas son muy caras, y en caso de haber pedidos urgentes los proveedores son muy lentos.



- 3. Ventas por catalogo e-comerce: Pedidos chicos y muy numerosos, ya sea por teléfono, internet o e-mail, y los envíos son inmediatos.
- 4. Logística por medio de terceros (3PL por sus siglas en ingles), centros de distribución: tienen la característica de tener múltiples clientes, además de tener asignado un espacio extra requerido para cambios en flujos de productos.

2.5 Diseño de un almacén

Un importante aspecto de un almacén es el diseño, sin embargo esto se debe hacerse tomando en consideración diversos aspectos además de la asignación de productos a las diferentes ubicaciones de almacenaje con el fin de que un almacén pueda operar eficientemente. Parte de estas consideraciones que menciona Hassan (2002) son:

- a) Localización de las puertas (entradas y salidas)
- b) Numero de pasillos necesarios, y dimensiones.
- c) Estimación de los espacios requeridos para almacenaje de los productos.
- d) Diseño de las diferentes zonas tanto operativas como administrativas del almacén.

En conjunto Thompkins (2007), señala una serie de objetivos acerca de la planeación de la distribución de un almacén:

- ✓ Usar el espacio eficientemente.
- ✓ Permitir el manejo de material más eficiente.
- ✓ Proveer el almacenamiento más económico en relación al costo del equipo, uso de espacio, y mano de obra para el manejo de materiales.
- ✓ Proveer la máxima flexibilidad para adecuarse a los cambios en los requerimientos de almacenamiento y manejo de materiales.



Roodbergen y Vis (2006) definen que la planeación de un almacén debe darse de una manera continua es decir, debido a que el mercado y los requerimientos de los clientes están en un cambio constante, el diseño de un almacén deberá adecuarse a estas características, permitiendo satisfacer los requerimientos del cliente y mantener sus procesos de manera estable.

"Un almacén exitoso maximiza el uso efectivo de los recursos mientras satisface los requerimientos de los clientes" (Thompkins, 2007).

Hassan (2002), proporciona una serie de consideraciones que pueden darnos una idea más clara sobre el diseño de un almacén entre las cuales están:

- 1. Especifica el tipo y propósito del almacén.
- 2. Predicción y análisis esperado de la demanda.
- 3. Determinar niveles de inventario óptimo.
- 4. Definir zonas de dentro de un almacén.
- 5. Diseñar sistemas para el manejo de materiales, clasificación y almacenamiento de los productos.
- 6. Determinar los requerimientos de espacios.
- 7. Definir la ubicación de las puertas (entrada/salida)
- 8. Arreglo de almacenamiento.

2.6 Tipos de configuraciones para almacén (Layout)

Después de que se ha definido los tipos de almacenes, dimensiones, ubicaciones y demás especificaciones correspondientes al tipo de material y cantidades a almacenar, se debe tomar en cuenta cual será la configuración o tipo de lay out correcto que se deberá utilizar.

Thompkins (2007) afirma que un diseño efectivo de la configuración de lay out permitirá optimizar las actividades de un almacén, es decir, conseguirá un flujo de materiales tan eficiente dentro de los almacenes, eliminando desperdicios en tiempos y distancias. El papel de los almacenes en la Cadena de Suministro ha evolucionado de ser instalaciones dedicadas a almacenar a convertirse en centros enfocados al servicio (Rowenhorst, 2000).



Los objetivos del diseño de los almacenes son facilitar la rapidez de la preparación de los pedidos, la precisión de los mismos y la colocación más eficiente de las existencias (Roodbergen & Vis, 2006), todos ellos en pro de conseguir ciclos de pedido más rápidos y con mejor servicio al cliente. Roodbergen y Vis (2006) mencionan que cuando se requiere diseñar un almacén, se deben de tomar en cuenta 2 fases distintas:

- 1. La primera es el diseño del lay out, es decir la administración de espacios
- 2. La ubicación física de la distribución de los productos dentro del área de almacenamiento.

Por el momento analicemos la primera de ellas, y revisaremos los parámetros y consideraciones que hay que tomar en cuenta al momento de diseñar un almacén. Más adelante nos enfocaremos en cuáles son los distintos tipos de almacenamiento y cuáles son las técnicas más usadas así como sus ventajas.

Gu et al. (2010) divide las decisiones de diseñar un almacén en 5 principales categorías: a) Seleccionar un estructura y orientación del pasillo, b) numero de pasillos, c) ubicación de las puertas de recepción y envío de material, d) políticas de almacenamiento y e) dimensiones de los departamentos o áreas administrativas.

El lay out de un almacén debe asegurar el modo más eficiente para manejar los productos que se encuentren en él, con el objetivo de que pueda proporcionar continuamente existencias y brindar un buen servicio al cliente (Petersen, 1999).

Cuando se realiza el lay out de un almacén, se debe considerar la estrategia de entradas y salidas del almacén y el tipo de almacenamiento que es más efectivo, dada las características de los productos, el método de transporte interno dentro del almacén, la rotación de los productos, el nivel de inventarios a mantener, el embalaje y pautas propias de la preparación de pedidos (Bartholdi & Hackman, 2011).



Almacén de Cargas unitarias

El tipo de almacén más simple que mencionan Gu y Meller (2009), es el de un almacén de cargas unitarias, el cual significa que una sola unidad de material es manejada a la vez, la unidad común que usualmente es manejada son las tarimas ya que la mayoría de estas están estandarizadas y la mayoría de los equipos de almacenamiento tales como montacargas o patines hidráulicos están diseñados para el manejo de tarimas.

Entonces se puede decir que tanto para espacio, tiempo y mano de obra: Toma cerca de n veces el espacio para almacenar n tarimas de una por una, y toma cerca de n veces la mano de obra para almacenar n tarimas de una por una (Bartholdi & Hackman, 2011).

Bartholdi y Hackman (2011) describen diferentes tipos de diseño de almacenes, desde los más comunes como un almacenamiento orientado de forma vertical, o el horizontal, o un almacenamiento con pasillos angulados "espina de pescado".

En general como se había mencionado, el objetivo de un buen diseño de un almacén es permitir un eficiente flujo de materiales, por lo cual se deberá de encontrar una estrategia para almacenar SKU's de tal forma que a los productos de mayor movimiento se puedan almacenar en las ubicaciones más convenientes.

Tipos de configuraciones y ubicaciones convenientes

Bartholdi & Hackman (2011), definen las ubicaciones más convenientes como aquellas en las que la distancia total recorrida desde que llega hasta que se entrega al cliente, (es decir, tanto para almacenar un producto a su respectiva ubicación como para recolectarlo), es menor en comparación a las demás celdas.



Generalmente cuando las puertas de entrada y salida se localizan en el extremo opuesto, existe una mayor cantidad de celdas con la misma conveniencia, esto no quiere decir que siempre sea mejor diseñar el almacén de este tipo, ya que en promedio la distancia recorrida es la misma (Oztukoglu 2011).

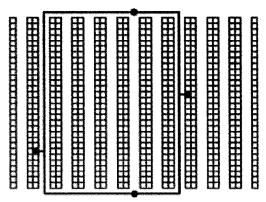


Figura 4. Acomodo vertical de un almacén

En la figura anterior, podemos apreciar como la ubicación de la derecha (azul) es más conveniente que la de la izquierda (roja), y esto es debido a que la distancia total de almacenamiento y de envío de la ubicación derecha es menor a la distancia total de la ubicación izquierda (Bartholdi y Hankman, 2011).

En las siguientes figuras 5 y 6, se representa cuales son las celdas con más conveniencia de cada configuración según Bartholdi y Hankman (2011), en donde las puertas están en el mismo lado, y en donde las puertas están situadas en lados opuestos (las celdas más oscuras son las de mayor conveniencia).



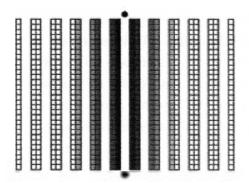


Figura 5. Puertas de entrada y salida ubicada en extremos opuestos

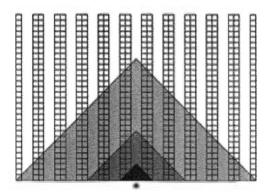


Figura 6. Puertas de entrada y salida ubicadas en el mismo lado

El número de ubicaciones convenientes depende del tipo de almacén que se tenga. Las ubicaciones más convenientes de las diferentes configuraciones de almacén, están ilustradas en la siguiente figura, para 3 diseños típicos diferentes en donde la intensidad del diagrama indica las ubicaciones más convenientes a lo largo del pasillo, desde la Puerta/Depósito, hasta una ubicación particular de una tarima (Koster & Roodbergen, 2008).

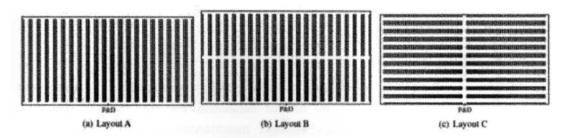


Figura 7. Diseño de ubicaciones óptimas (Koster & Roodbergen, 2008)



Koster y Roodbergen (2008) proponen y analizan otros 2 diferentes diseños en donde se minimizan las distancias de los viajes, haciendo que existan más ubicaciones convenientes. Esto lo podemos ver en la figura 8, esto se cumple para el caso en donde se visita una celda ubicación por viaje, es decir para visitar 2 ubicaciones o más, primero se deberá pasar por la puerta de entrada ya sea para tomar material y llevarlo a almacenar, o para dejar material para el siguiente envío.

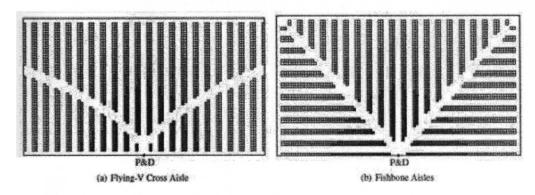


Figura 8. Diseño de ubicaciones óptimas (Koster & Roodbergen, 2008)

Configuración de pasillos

La mayoría de los almacenes tienen pasillos orientados paralelamente a las puertas de recibimiento y envío de productos ya que de esta manera aumenta el flujo de material. Esto puede tener muchas ventajas al momento de reducir distancias, por ejemplo si el montacargas debe regresar a la zona de control, después de almacenar el producto este tipo de configuración es conveniente (Gu & Meller, 2009).

Sin embargo esto no siempre es así, ya que muchas veces puede suceder que al momento de dejar un producto en su respectiva ubicación, el montacargas tendrá que ir por otro producto que será alistado para el envío al cliente, por lo que en estos casos la distancia de recorrido considerablemente grande. Gue y Meller (2009) y Koster y Roodbergen (2008) afirman que las distancias totales en los viajes pueden ser reducidas hasta un 20%, si se reorientaran algunos pasillos y si se incluyeran pasillos angulados.



La figura 9 muestra uno de los ejemplos más comúnes de almacenamiento en donde un pasillo cruza todo el almacén, haciendo que el traslado de productos sea más rápido, y permita una mayor movilidad entre pasillos (Bartholdi & Hanckman, 2011).

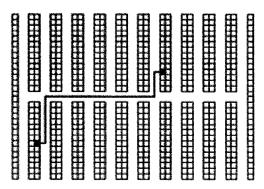


Figura 9. Configuración con Pasillo central

Roodbergen y Vis (2006), demostraron que los puntos de entrada y salida de un almacén alcanzan su punto óptimo en cuanto a reducir distancias, cuando se encuentran en medio de las instalaciones.

La figura 10 muestra un diseño con pasillos alineados de forma diferente, con lo cual las distancias pueden reducirse significativamente, sin embargo, existen ciertas inconveniencias al tomar en cuenta esta configuración, ya que el almacén deberá ser un poco más grande para que no afecte el espacio ocupado por los pasillos y poder almacenar el mismo número de tarimas (Bartholdi & Hanckman, 2011).

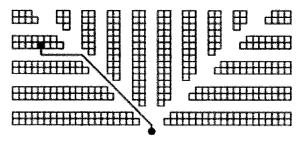


Figura 10. Almacén con Pasillos angulados



Pohl et al, (2009), demostró que el óptimo lugar para colocar un pasillo que corra a lo largo de un almacén, es ligeramente atrás de la mitad. Ellos también examinaron que los diseños "Fishbone" ofrecen una disminución en cuanto a las distancias de traslados, sobre los diseños comunes de los almacenes tradicionales. También evaluaron los cambios en el área de almacenamiento, "Fishbone", sobre diseños tradicionales, y mostraron que este último, requiere aproximadamente 5% más espacio.

Pohl et al, (2010), analizó tres diferentes diseños, el tradicional, el "Fishbone", y el "Flying-V" (Figura 2.6), bajo políticas de almacenamiento de acuerdo al volumen de ventas. Mientras que Gu et al (2010), investigó la distancia de viajes esperados, de múltiples puntos de entrada y salida (P&D), en un solo lado del almacén, y mostró que el diseño de "Flying-V" aun tiene múltiples beneficios pero no tantos como cuando estos puntos están localizados en el centro del almacén.

Dado que la ubicación de estos puntos de entrada y salida de materiales juegan un importante papel en la distancia de los traslados, en nuestra simulación nos enfocaremos en que estos puntos estén centralmente ubicados en el almacén.

2.7 Estrategias de almacenamiento

En este tema analizaremos varias estrategias de almacenamiento que existen en la literatura y revisaremos cuales de ellas son las más usadas y las ventajas y desventajas de utilizarlas. Estas estrategias impactan en los requerimientos totales de almacenamiento y en que tan eficientemente los productos pueden ser recuperados del almacenamiento para cumplir con los pedidos.

Las ubicaciones de almacenaje representan un costo importante dentro de un almacén, puesto que estas representan espacio y por consecuencia, costos de renta, equipo de manejo, climatización, seguridad, mano de obra, etc. (Hompel, 2007).



Además las ubicaciones de almacenaje necesitan típicamente equipo especializado tal como estantes o racks, que permitan un mejor acomodo del producto (Tompkins, 2007).

Es por esto que en la literatura se han analizado diversas estrategias de almacenamiento, que ayudan a una óptima utilización tanto de espacios como facilidad de búsqueda de productos y ahorros en las distancias de traslados desde y hacia la ubicación de un producto determinado.

El desempeño y la eficiencia de las operaciones de almacenamiento y recolección de productos, dependen principalmente de los siguientes factores (Le-Du & Koster, 2005):

- 1. Los patrones de la demanda
- 2. La configuración (lay out) del almacén
- 3. Estrategias de almacenamiento
- 4. Procesamiento de pedidos por lotes
- 5. El método de ruteo y orden de recolección.

De los cuales Le-Du y Koster (2005) afirmar que a excepción del primer factor, los demás son usualmente controlables, y han sido investigados por muchos investigadores recientemente.

Bartholdi y Hackman (2011) reconocen dos tipos de estrategias de almacenamiento, el almacenamiento dedicado, en el cual mencionan que todos los productos deben tener una ubicación predefinida y si son varias celdas estas deben de estar adyacentes (concentrados), y el almacenamiento compartido, en el cual una misma ubicación puede ser compartida a través del tiempo por diferentes SKU's (usualmente el primero que llega usa la mejor disponible) y los productos pueden estar distribuidos en diferentes ubicaciones dentro del almacén.

Roodbergen y Vis (2006) y Zeng et al (2002) mencionan que las principales políticas utilizadas para asignar tarimas a una ubicación determinada dentro del área de almacenaje de un almacén son: a) ubicación disponible más cercana, b) dedicado, c) por clases ó zonas, d) ubicación por nivel de ventas y e) aleatorio.



Almacenamiento por ubicación disponible más cercana

En esta estrategia de almacenamiento, las ubicaciones disponibles dentro del almacén, son rastreadas por un sistema de administración y una vez que los productos lleguen almacén, son asignados las ubicaciones al а almacenamiento disponibles más cercanas a los puntos de recepción y envío del almacén (Rowenhorst et al., 2000). Esta técnica es ampliamente utilizada, sin embargo se necesita sistemas de administración de almacenes (WMS) especializados que permitan realizar este tipo de almacenamiento (Vijayaraman y Osik, 2006).

Park y Lee (2007) afirman que en la actualidad esta técnica es utilizada principalmente en la industria automotriz y de alta tecnología que cuenten con almacenes con sistemas de almacenamiento y recolección automatizados (AS/RS, por sus siglas en ingles).

Una de las características importantes a recalcar, es que los productos en ningún momento están asignados de manera concentrada, por lo cual existen ciertas ventajas y desventajas al utilizar este acomodo (Muppani, 2008).

Park y Lee 2007 describen que la principal ventaja es que el sistema puede brindar la mejor ruta para recolectar 2 o más productos, eligiendo las ubicaciones en donde estos productos se encuentren más cerca. Mientras que su principal desventaja es que no existe un correcto adecuado control visual de las existencias y que el recolector (picker) no puede aprenderse las ubicaciones de los productos ya que estos están en constante cambio, por lo que debe utilizarse algún sistema de almacenamiento.

Almacenamiento Dedicado

Una de las estrategias más comunes y más utilizadas en la actualidad es la del almacenamiento dedicado, el cual consiste en que cada ubicación de almacenaje de un almacén es asignado a un solo producto y solo ese producto puede ser asignado ahí (Bartholdi & Hackman, 2011).



Como las ubicaciones de los próductos no cambian, los productos más populares, es decir, con mayor venta, pueden ser almacenados en las ubicaciones más convenientes (Muppani & Adil, 2008).

Existen diversas ventajas con este tipo de acomodo, ya que, como las ubicaciones no cambian con el tiempo, los recolectores (pickers) pueden aprenderse el diseño del almacén y la ubicación de cada producto a través de su experiencia, lo cual permite que el recolector no tenga que andar buscando y pueda saber a dónde dirigirse para tomar un producto determinado, permitiendo así minimizar el tiempo de búsqueda de los productos (Bartholdi & Hackman, 2011).

Muppani y Adil (2008) definen que esta estrategia consiste en dividir las áreas de almacenamiento por zonas, y asignar a cada producto a una zona especifica, manteniendo la regla principal de asignar una zona o ubicación a un solo producto y que solo ese producto pueda ser asignado ahí. Pohl y Meller (2009) mencionan que el objetivo de este almacenamiento es tener a todos los productos del mismo tipo en una sola zona, es decir mantenerlos "concentrados", lo cual permite una mayor percepción del lugar en donde esta cada uno de los productos.

Koster y Roodbergen (2008) afirman que diversas medidas se pueden tomar en cuenta en el momento de decidir la zona a la que se enviará cada producto, pudiendo tomarse en cuenta el volumen de ventas de los mismos, el espacio total ocupado dentro del almacén, o por características del producto como el precio (para evitar pérdidas por robos), o climatización, ya sea que por la naturaleza del producto se requiera mantenerlo bajo una cierta condición en el ambiente, como humedad o temperatura.

Bartholdi & Hackman (2011),nos señalan el problema con el que almacenamiento dedicado concentrado es que utiliza el no se eficientemente, dado que cuando llega un producto tiene que ser almacenado dentro de su zona y no en la ubicación más conveniente, aunque está este por lo cual cuando entremos a un almacén con este estrategias, se puede observar que muchas ubicaciones están casi vacías, muchas otras están medio llenas y muchas están casi llenas, dándonos en promedio una capacidad de almacenamiento de un 50%.



Otra de las desventajas del almacenamiento dedicado es que la ubicación es reservada, es decir, no se le puede asignar ningún otro producto que acabase de llegar, aún y cuando esta, está vacía e incluso para los productos que están fuera de inventario (Park y Lee, 2007). Además de que para cada producto debe haber espacio suficiente para almacenar el nivel máximo de inventario. Sin embargo este tipo de almacenamiento puede ser muy beneficioso cuando los productos tienen pesos significativamente diferentes (Koster and Neuteboom, 2001).

El almacenamiento Dedicado puede ser muy útil si es aplicado en áreas pequeñas de recolección (pick área), con un volumen de área mayor para la reposición que puede tener por ejemplo el almacenamiento aleatorio, de esta manera, en estos casos, las ventajas de un almacenamiento dedicado todavía se mantienen, mientras que las desventajas son de menor importancia porque el almacenamiento dedicado solo se aplica en un área pequeña (Koster et al, 2006).

Gu et al (2007) describen que la forma más sencilla de acomodar el inventario en el almacén siguiendo este tipo de estrategias de almacenamiento dedicado es la asignar los productos en el almacén conforme vayan llegando, procurando que todo los productos de un mismo tipo queden juntos, y reservar esas ubicaciones solo para esos productos. Sin embargo este tipo de asignación no es la mejor ya que las distancias y el tiempo de recorrido para almacenar y recolectar productos es muy grande (Le-Duc, & De Koster, 2005).

Koster y Roodbergen, (2008) comentan que para poder administrar un almacén de tipo Dedicado, se debe definir primero cual será el orden para acomodar todos los productos en el almacén, y establecer un factor o parámetro por el cual se evaluarán estos productos y sobre el cual asignar ese orden. Koster et al (2006) mencionan que la principal desventaja de almacenamiento dedicado es que estrategia de la demanda varía cambian constantemente. las cantidades de producto ordenar frecuentemente. Por lo que cada cambio requiere un nuevo ordenamiento de productos en un almacén resultando en una gran reorganización de los inventarios. Mientras que Chan (2011) una solución temporal podría ser llevar a cabo una reacomodo por periodo.



Almacenamiento por zonas o clases

Le-Duc y Koster (2005) publican que otra de las estrategias más comunes a seguir es la del almacenamiento basado en zonas, el cual es una estrategia híbrida entre un almacenamiento dedicado y uno aleatorio.

Se basa en dividir el inventario en clases basado en la popularidad de cada producto, o la frecuencia en la que son visitados, la idea es agrupar varios productos en clases de tal forma que la clase de más rápido movimiento contenga solo entre el 15 y 20% de los productos almacenados, pero que contribuyan cerca del 80 al 85% del volumen de ventas (Koster et al, 2006). En donde cada clase asignada se vuelve un área dedicada del almacén.

El almacenaje dentro de esta área o zona, es aleatorio, no importa qué producto esté asignado a una ubicación en particular, siempre y cuando este producto corresponda a la clase o zona determinada. Koster et al (2006) menciona que las clases deben ser determinadas por alguna medida o parámetro ya sea por volumen de ventas, número de visitas o por la relación entre volumen y ventas. Pohl y Meller (2010) afirman que a menudo el número de clases es restringido a tres (A, B y C), aunque en algunos casos, al añadir más clases se pueden obtener beneficios adicionales con respecto a los tiempos de viaje.

Esta estrategia de almacenaje es ampliamente usada en la práctica ya que es fácil de implementar y mantener, y puede fácilmente manejar los cambios de las frecuencias del producto, además utilizando esta estrategia de almacenaje, permite una substancial reducción en los tiempos totales de traslado de los recolectores, comparado con el almacenamiento aleatorio (Petersen, 1999).

Tang y Chew (1997) consideraron estrategias de almacenamiento por lotes, en un sistema de recolección de órdenes manual de piezas pequeñas, las cuales procesan un alto volumen de órdenes, colocándolas a estas en una sola clase. Muppani y Adil (2008) modelaron una formación de clases considerando una reducción de cada área, costos de manejo, y costos de espacio por almacenamiento, y desarrollaron un eficiente procedimiento para una solución óptima.



Chan y Chan (2011) presentaron un estudio de una simulación de un caso real con respecto a un problema de asignación de ubicaciones de almacenamiento, de una recolección manual y racks multiniveles dentro de un almacén. Ellos mencionaron que la llave de una efectiva implementación de un sistema de asignación de ubicaciones, es un arreglo adecuado de sistemas de almacenamiento (WMS), y la variedad de artículos en el pedido del cliente.

Cuando se trata de un almacén en cual se hace recolección de productos de uno a uno, tiene sentido el agrupar los productos con mayor volumen de ventas en las ubicaciones más cercanas a las puntos de entrada y salida (P&D) del almacén; sin embargo, cuando un pedido típico de un cliente tiene múltiples productos, y todos estos deben ser recolectados en un solo viaje, no tiene mucho sentido el realizar este tipo de asignación basado en el volumen de ventas, por lo que una mejor estrategia sería el identificar estos productos típicos, y asignarlos de tal manera que la distancia total de viaje y el tiempo puedan ser minimizados (Ronald et al, 2007).

Ronald, Peter, y Sunderesh (2007) desarrollaron una estrategia de un arreglo de ubicaciones orientadas a los pedidos (OOS, Order Oriented Slotting), en la cual los artículos son almacenados de tal manera que el tiempo total necesario para recolectar todos los productos dentro de una orden es minimizado.

Almacenamiento por volumen de ventas

Otro de los métodos utilizados es agruparlos solo por el *número de ventas* de cada producto. Esta estrategia distribuye los productos a las ubicaciones más convenientes de acuerdo a los productos con mayor tasa de ventas, mientras que los productos con las más bajas tasa de ventas son localizados al fondo del almacén (Koster et al, 2006).

Una de las variantes más utilizadas, para optimizar la manera de asignar estos productos es la de *COI* (por sus siglas en ingles Cube per order index) el cual ayuda a reducir significativamente las distancias de traslados (Malmborg, 1995).



Koster et al (2006) define este método como la relación entre el máximo espacio requerido para almacenar un producto y el volumen de viajes requerido del mismo para satisfacer su demanda en un periodo de tiempo determinado (Koster et al, 2006). En donde los productos con el menor COI son asignados en las ubicaciones más convenientes.

Tanto el método de almacenamiento por COI como el de volumen total de ventas son equivalentes para un almacén de cargas unitarias siempre y cuando se cumplan 2 condiciones (Pohl & Meller, 2009):

- 1. Tanto las unidades de los diferentes SKU's como las ubicaciones son del mismo tamaño.
- Cada tarima de un mismo producto es almacenado y tratado como un producto diferente con su demanda debidamente proporcionada.

Una de las principales desventajas de este método es que las tasas de demanda varían constantemente, por lo que el ordenamiento del producto cambia constantemente. Por lo que cada cambio se convertirá en un nuevo reordenamiento de productos dentro del almacén (Pohl & Meller, 2010).

La adopción de estas técnicas de asignación de ubicaciones u otras técnicas basadas en la frecuencia de demanda generalmente requieren una mayor información, como el ordenar y almacenar datos, que deben ser procesados a fin de ordenar y asignar productos (Koster et al., 2006).

Almacenamiento Aleatorio

Park y Lee (2007) definen está estrategia como "una política de almacenamiento aleatorio cada una de las ubicaciones disponible tiene la misma probabilidad de ser seleccionada para almacenar un producto".

Es decir, cada que llega producto nuevo para ser almacenado, se revisan las ubicaciones que estén disponibles en el almacén, y aleatoriamente se asigna una en donde el producto será almacenado. Para esto es necesario que el almacén cuente con un sistema que permita rastrear tanto la ubicación de cada producto, como las ubicaciones disponibles, y que permita proporcionar aleatoriamente una ubicación (Park y Lee, 2007).



El almacenamiento aleatorio es ampliamente utilizado en la industria por la simplicidad y la alta utilización de ubicaciones de almacenaje, además de reducir la congestión de los pasillos, a pesar de aumentar las distancias en los traslados. (Petersen, 1999).

Como bien se menciona, con esta estrategia se mejora el uso de espacio, ya que, la idea aquí es asignar un producto a más de una ubicación de almacenamiento. Cuando una ubicación se vuelve vacía, esta ubicación está disponible para algún reabastecimiento, que en la mayoría de casos puede ser para un producto diferente (Barholdi & Hackman, 2011).

Este espacio puede ser llenado nuevamente, y rara vez tiene que esperar hasta que el producto asignado originalmente sea reabastecido. De este modo hay más ubicaciones de almacenamiento, en el cual el producto está distribuido, menos producto en cada ubicación y por lo tanto la más conveniente de esas ubicaciones es vaciada, y de la misma forma reasignar el espacio a un diferente producto (Gu et al, 2007).

En general esta estrategia de almacenamiento aumenta de un 50 a un 60%, en cuanto al uso eficiente de espacio se refiere (Barholdi & Hackman, 2011).

Barholdi & Hackman (2011) mencionan que una de las características más importantes en esta estrategia de almacenamiento aleatorio, es que permite que los productos se encuentren almacenados de manera distribuida, es decir, los productos del mismo tipo no se encuentran juntos, por lo cual, en el caso de querer recolectar 2 productos, se puede elegir la ubicación en donde estos productos estén más cerca uno del otro, y así poder reducir la distancia total y el tiempo de recolección de estos productos.

Sin embargo esta estrategia de asignación aleatoria también tiene sus desventajas. Una desventaja es que el tiempo de almacenamiento aumenta cuando se recibe producto nuevo, ya que este tiene que ser llevado a diferentes ubicaciones. Por otro lado esto no ocurre cuando se trata de un almacén de Cargas unitarias, ya que debido a que el flujo de movimiento de materiales es igual a la unidad, cada uno de los productos es asignado a la ubicación en particular (Goetschalckx, 2010).



Otra de las desventajas significativas es que los tiempos de traslado aumentan considerablemente, ya que no existe una distinción entre los productos, ya sea por rotación de inventarios o por volumen de ventas (Petersen, 1999).

Debido a que las ubicaciones cambian conforme el tiempo, ya que tan pronto las ubicaciones son vaciadas, son reasignados con otros productos. Lo que significa que los almacenistas no puedan aprenderse las ubicaciones, por lo que deberán ser dirigidos por un sistema de administración de almacenes (WMS por sus siglas en ingles) (Osyk y Vijayaraman, 2005).

Existen además otras complicaciones que pueden ser por falta de control o disciplina al utilizar esta estrategia aleatoria. Por ejemplo, imaginemos que el almacenista o recolector ha sido enviado al otro lado del almacén, a traer producto para un cliente. Este almacenista puede ser tentado a seleccionar producto de una ubicación más conveniente, y al hacer esto se podrían crear discrepancias entre lo que hay en libros y el inventario físico en estas ubicaciones (Barholdi & Hackman, 2011).

En general para apoyar a esta estrategia de almacenamiento, se pueden definir diferentes reglas para complementar esta estrategia y que ayuden a administrar estas desventajas, como por ejemplo, el tomar producto para el envío de un cliente, desde la ubicación con menos producto, en lugar de tomarlo de la celda más conveniente, y esto es para hacer la ubicación vacía y reciclarla lo antes posible (Osyk y Vijayaraman, 2005).

Por estas razones un inventario compartido, requiere software de apoyo especializado (WMS), además de una mayor disciplina en los procesos del almacén (Hompel, 2007). Gran parte de estos problemas pueden ser solucionados mediante la tecnología de *Identificación por Radiofrecuencia* (RFID, por sus siglas en ingles).

Con la aplicación del RFID permite un mayor control de los inventarios y además las ubicaciones de los mismos, en general RFID permite tener rastreado todos los productos existentes en el almacén en tiempo real (Osyk y Vijayaraman, 2005).



En resumen la mayoría de las técnicas comunes más utilizada, en donde el proceso de almacenamiento y recolección no se realiza de manera automatizada (es decir existe un almacenista encargado de acomodar y recolectar las ordenes del cliente), optan por un almacenamiento concentrado, ya que permite un mejor control de inventarios, y una mayor facilidad para el almacenista dado que puede memorizar el lay out de las ubicaciones de cada producto (Gu et al, 2010).

Mientras que una distribución compartida de los productos (donde un determinado producto puede ser almacenado en múltiples ubicaciones o zonas diferentes), representa una mayor ventaja en tiempos de recolección del producto (Barholdi & Hackman, 2011). Aplicar este tipo de almacenamiento en un almacén de cargas unitarias el mayor beneficio está en el de poder asignar diferentes productos con el mayor volumen de ventas a las ubicaciones más cercanas a las puertas de entrada y salida de material (Park & Lee, 2007).

Sin embargo en la mayoría de los almacenes convencionales el proceso de almacenamiento y recolección no se lleva a cabo por cargas unitarias, sino que se almacenan y recolectan varios productos a la vez, dependiendo la variedad de productos que se hayan recibido, o la variedad que se establezca en los pedidos de los clientes, en este punto es donde surge una ventaja adicional (Barholdi & Hackman, 2011).

Mientras que en un almacén convencional, la ventaja esta en colocar los productos de tal manera que en un solo viaje se puedan recolectar todos los artículos de un mismo pedido del cliente, minimizando así la distancia total del viaje (Pohl & Meller, 2009).

2.8 Identificación por radiofrecuencia (RFID)

La tecnología Identificación por radiofrecuencia (RFID) no es nueva, se conoce desde 1940, pero recién en los últimos años se han alcanzado los avances tecnológicos suficientes para ponerlo en práctica en la cadena de distribución (Davis & Luehlfing, 2004).



La cadena alemana Metro, la norteamericana Wal-Mart y el departamento de Defensa de los Estados Unidos han pedido a sus principales proveedores que comiencen a implementar microchips que utilicen esta tecnología para sus envíos. Por su parte, compañías como Gillette o Procter & Gamble están experimentando con el uso de sistemas RFID en almacenes para prevenir pequeños hurtos y monitorizar el inventario de sus estanterías (Jabjiniak & Gilbert, 2004).

La tecnología RFID consiste de una pequeña etiqueta electrónica o "tag" que contiene un minúsculo microprocesador y una pequeña antena de radio, colocados en un pallet, un embalaje y/o un artículo, con un identificador único (de 64 ó 96 bits) llamado Código Electrónico de Producto (Godínez, 2008).

Osyk y Vijayaraman, (2005) ejemplifican como puede ser colocado un lector de radiofrecuencia (RF) en puntos estratégicos a lo largo del camino donde se trasladan los pallets, embalajes o artículos en su recorrido desde el punto de origen del proceso de manufactura hasta el punto de exhibición. La colocación de estos lectores puede abarcar el piso, las puertas, los montacargas del almacén, el andén de embarque, el centro de distribución, el andén de recibo, la bodega de la tienda, y así sucesivamente, incluyendo los anaqueles de la tienda.

Cuando una etiqueta RFID pasa a través de un punto de verificación, el lector de RF leerá el código de la etiqueta, si es etiqueta activa (etiqueta alimentada por una batería) o bien se emitirá una onda o señal de RF a fin de inducir una corriente a la antena de la etiqueta pasiva (etiqueta sin batería interna) (Miles et al, 2008). Luego, la información de la etiqueta es leída y enviada a una base de datos intermedia ("Middleware"), donde se despliega una gran cantidad de información sobre lo que está etiquetado, y se activan mecanismos de integración con los sistemas de información del negocio (Miles et al, 2008).

Compañías en industrias en las que se mueven rápidamente los bienes de consumo, electrónica y ropa, ya están en la primera fase de implementación de nuevas tecnologías entre las cuales se utiliza RFID (Kim et al, 2008; Lekakos, 2007).



Recientemente, la adopción de una innovación tecnológica para las necesidades del negocio en el momento adecuado, es una de las decisiones estratégicas más importantes que una empresa tiene que hacer para obtener y mantener una ventaja competitiva (Godínez, 2008).

Jones, (2004) menciona que la importancia estratégica de la adopción y la implementación de RFID trasciende las fronteras corporativas, la tecnología tiene el potencial de integrar a la perfección la cadena de suministro. Muchas organizaciones estadounidenses como FedEx, Dell, Procter and Gamble, y el Departamento de Defensa de EE.UU. han adoptado con éxito la RFID para los sistemas de la cadena de suministro (Jones, 2004). Wal-Mart, una empresa con una de las redes de suministro más amplia y sofisticada a nivel mundial, ha sido la fuerza impulsora más influyente en la adopción de la tecnología de radiofrecuencia (Hompel, 2007).

Características y aplicaciones RFID

Uno de los principales propósitos de implementar la tecnología de radiofrecuencia, son la identificación, autentificación, ubicación y la adquisición de datos de manera automática, que sin duda han logrado llamar la atención de diversas empresas por los beneficios que esta tecnología representa (Godínez, 2008).

Existen 5 características principales por las que el uso de RFID ha logrado desarrollarse, y de tal manera que la mayoría de las empresas hayan realizado (Davis & Luehlfing, 2004).

- 1. No requiere "línea de vista": La lectura de códigos de barra requiere que exista "línea de vista" directa entre el scanner y un código de barras. Las etiquetas RFID pueden ser leídos a través de materiales sin tener línea de vista.
- 2. Lectura más automática: Las etiquetas RFID se leen automáticamente cuando los productos etiquetados pasan cerca del lector, reduciendo el trabajo requerido para escanear el producto.



- 3. Ratios de lectura mejorados: Las etiquetas RFID ofrecen mayores ratios de lectura que los códigos de barra, especialmente en las operaciones de alta velocidad, como la clasificación de empaques.
- 4. Mayor capacidad de datos: Las etiquetas RFID pueden contener múltiples detalles del artículo, como información del lote, peso, etc.
- 5. Capacidades de escritura: Las etiquetas RFID pueden ser actualizados con nuevos datos conforme se concluye cada etapa de la cadena de distribución.

Sin embargo Davis & Luehlfing, (2004) también nos mencionan ciertos retos a los cuales esta tecnología se ve enfrentada, como los costos del sistema, los tipos de materiales, confiabilidad y consistencia de la cobertura del sistema, interferencia electromagnética, variedad de frecuencias de radiofrecuencia.

En la actualidad RFID ha sido implementado en distintos sectores, entre sus aplicaciones más destacadas están las de: localización y seguimiento de objetos o personas por medio de tarjetas o credenciales, control de accesos a instalaciones, identificación de materiales, control de robo, automatización de procesos de producción e inventarios, entre otras (Godínez, 2008).

Beneficios de implementar RFID dentro de un almacén.

Se ha afirmado que la RFID ofrece la posibilidad de mejorar en gran medida la eficiencia de la cadena de suministro, ya que permite a las empresas realizar un seguimiento de la información del producto y permite un mayor control y flexibilidad en la gestión de los bienes a medida que avanzan a través de la cadena de suministro (Jabjiniak y Gilbert, 2004).

Los principales beneficios de la RFID son reconocer a cada elemento o producto, mientras se mueven a través de la cadena de suministro, y compartir información con las diferentes partes de la empresa, permitiendo la colaboración en la gestión de inventarios, planificación, previsión y reabastecimiento (Hellström & Wiberg, 2010).



Idealmente, cuando tienen RFID se ha aplicado plenamente en los centros de distribución, se podría eliminar la necesidad de códigos de barras y el conteo manual en la recepción de los almacenes. Esto tiene el potencial de reducir tanto las horas de trabajo necesarias y la cantidad de error inherente al ser humano en los actuales métodos de escaneo con el código de barras, además, al colocar lectores de radiofrecuencia en la salida, podría evitar pérdidas por robo de material (Osyk y Vijayaraman, 2005).

Además permite eliminar el enviar órdenes incompletas o con productos diferentes a los que pidió el cliente, ya que se puede conocer en tiempo real de manera automática y con precisión, qué productos están siendo enviados y en qué cantidades.

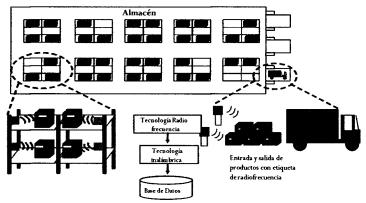


Figura 11. RFID en un almacén (Chow et al, 2006)

Otro de los beneficios de esta tecnología, es que podría ayudar con los procesos de recolección y almacenamiento y mejorar la productividad de los empleados dentro de un almacén (Alcerreca, 2007).

Esto es que al tener implementado RFID dentro de un almacén, se puede tener la certeza de donde está cada producto, así como el nivel de inventario del mismo, pudiendo abrir una nueva oportunidad para un esquema diferente en las estrategias de almacenamiento (Bartholdi y Hackman, 2011).

Las estrategias de almacenamiento más comunes sugieren una distribución de inventario concentrada, ya que de esta manera se puede saber donde se encuentra cada producto, y la confianza de que un solo producto solo puede ser localizado en una zona determinada.



Mientras que las estrategias de almacenamiento de tipo aleatorias representan inconvenientes al no saber con exactitud dónde está cada producto, ya que el almacenista por conveniencia o alguna razón, pudo haber asignado el producto en alguna ubicación diferente a la que se le dijo. La tecnología de identificación por radiofrecuencia permite una mejor administración en estos casos, ya que no importa dónde esté almacenado el producto, o si fue asignado a múltiples ubicaciones diferentes, se puede tener la certeza de la ubicación que ocupa dentro del almacén y su nivel de inventario con mayor precisión que ayudaría a una mejor planeación (Alcerreca, 2007).

Aunque hay muchos beneficios para la implementación de RFID, la adopción de la tecnología RFID no está exenta de desafíos. El mayor desafío para el uso generalizado de la tecnología RFID es la capacidad de controlar los costes sin dejar de darse cuenta de los beneficios percibidos (Jones et al., 2004).

Estos costes incluyen más que el costo de la propia etiqueta. De acuerdo con Jones et al. (2004), además de la etiqueta de precio, las organizaciones también deben considerar el costo de la aplicación de etiquetas a los productos, el costo de compra e instalación de los lectores, los costos de integración de sistemas, el costo de la capacitación y reorganización, y el costo de la implementación de soluciones de aplicación.

Un estudio sobre la tecnología RFID en la industria de almacenamiento por Osyk Vijayaraman (2005) concluyó que los costos y los beneficios eran las principales preocupaciones de las empresas manufactureras de aplicación RFID seguido por las preocupaciones sobre la integración y las normas.

Algunos han criticado a la tecnología RFID, alegando que es demasiado caro y que es poco probable que la inversión valga la pena si se lleva a cabo a nivel de artículo (Álvarez, 2004). A pesar de algunos ensayos tempranos de las etiquetas RFID a nivel artículo por Gillette y Tesco, el retorno de la inversión para el etiquetado de los artículos sigue siendo una preocupación para muchas empresas debido a que los costos de las etiquetas y la infraestructura asociada son todavía mayores que los beneficios previstos (Gu et al, 2010).



Capitulo 3 Metodología Propuesta

3.1 Introducción

Como bien lo mencionábamos anteriormente, existen diferencias significativas entre las diversas estrategias de almacenamiento. Las técnicas actuales del almacenamiento aleatorio tienen un eficiente uso del espacio pero suelen tener poco control del inventario y sus ubicaciones dentro del almacén y, usualmente, mayores tiempos de recolección. Las técnicas actuales para un almacenamiento dedicado usan menos eficientemente el espacio pero mejoran el control de los productos y los tiempos de recolección.

Como se mencionó anteriormente, un elemento común a la mayoría de las estrategias publicadas de almacenamiento dedicado es que asume que los productos del mismo tipo deben de estar colocados en ubicaciones adyacentes del almacén (le llamaremos almacenamiento dedicado concentrado) para facilitar que el recolector pueda recordar las ubicaciones de cada SKU y decidir la mejor ruta para recolectarlo así como para facilitar el control visual del inventario.

Las restricciones anteriores son válidas cuando es el recolector quien debe recordar las ubicaciones, identificar visualmente los inventarios y trazar las rutas de recolección, sin embargo dejan de serlo cuando existen sistemas automáticos como los sistemas basados en RFID que permiten:

- Asignar en forma automática y registrar las ubicaciones precisas de cada SKU.
- Registrar en forma precisa y en tiempo real los movimientos de los SKU's en el almacén y las existencias de inventario en cada ubicación.
- Trazar las rutas de recolección en forma automática



 Dar las indicaciones de recolección al trabajador, en tiempo real, por comunicación inalámbrica.

Si se asume que se cuenta con estos sistemas ya no es necesario que las distintas ubicaciones de un SKU en el almacenamiento dedicado estén concentradas sino que pueden ahora estar distribuidas.

Esto abre oportunidades nuevas para seleccionar cada una de las ubicaciones destinadas a un SKU en forma diferenciada y mejorar los tiempos de recolección, los cuales, de acuerdo a Bartholdi y Hackman (2011) representan el 55% del tiempo total de la recolección de un pedido y este a su vez el 55% del costo operativo de un almacén.

En los siguientes apartados se analizan en detalle estas nuevas oportunidades y se propone una estrategia de almacenamiento diferente, a la cual le llamamos una *Estrategia de Almacenamiento Dedicada Distribuida*, la cual consiste en asignar ubicaciones dedicadas para cada SKU pero que, cuando el SKU requiera varias ubicaciones por su nivel de inventario máximo, estas ubicaciones no tengan qué estar adyacentes.



3.2 El sistema bajo estudio

El almacén y los productos.

Considérese un almacén de cargas unitarias con las siguientes características

- Existen n ubicaciones de almacenamiento disponibles, cada una con capacidad de almacenar un número predefinido de cargas unitarias del mismo SKU al que denominaremos CAP.
- Se conoce la distribución de las ubicaciones en el almacén (Ejemplo: cualquiera de los presentados en las figuras 12, 13, 14 y 15). Dada esa distribución, para cada ubicación j se conoce la distancia total Dj que se recorre para almacenar una carga unitaria en la ubicación y para recolectarla cuando se requiere.
- Administra m diferentes SKU's, cada uno de los cuales puede requerir varias ubicaciones
 - Ejemplo: Si cada ubicación tiene capacidad de almacenar 3 cargas unitarias y el inventario máximo de un SKU es de 12 cargas unitarias se requerirán 4 ubicaciones dedicadas a ese SKU.

El Sistema de administración de inventarios

Se asume que el almacén usa un sistema de administración de inventarios por revisión periódica y que para cada SKU; :

- Se conocen la demandas por periodo DemSKUi
- Se conoce el tiempo de resurtido TE_i
- Se conocen además los valores adecuados para estimar el periodo de tiempo de revisión periódica R_i y el valor de inventario máximo en pedido Si. Sin pérdida de generalidad en esta tesis R_i y Si se calcularán mediante el método de ventas perdidas.



3.3 El sistema RFID Propuesto

Como se mencionó anteriormente en esta tesis se asume que se cuenta con sistemas basados en RFID que permiten:

- Asignar en forma automática y registrar las ubicaciones precisas de cada SKU.
- Registrar en forma precisa y en tiempo real los movimientos de los SKU's en el almacén y las existencias de inventario en cada ubicación.
- Trazar las rutas de recolección en forma automática
- Dar las indicaciones de recolección al trabajador, en tiempo real, por comunicación inalámbrica.

En la figura 11, se puede apreciar el modelo sistema RFID propuesto para el almacén.

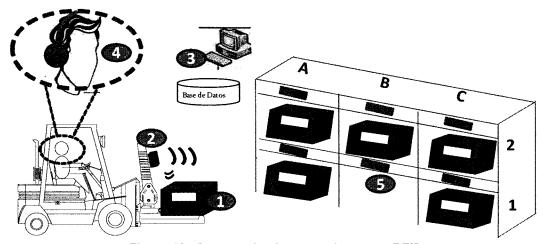


Figura 12. Proceso de almacenamiento con RFID

El sistema cuenta con los siguientes elementos

 Cada ubicación en el almacén tendría una etiqueta de identificación RFID para que el montacargas pueda reconocer y validar la localización donde está recolectando o almacenando una tarima (número de pasillo y número de rack)



- Cada tarima tendrá una etiqueta RFID que permitirá al montacargas identificar y validar la carga concreta que está transportando.
- El montacargas tendrá un lector RFID con capacidad de comunicación inalámbrica que le permitirá identificar el SKU que está almacenando/recolectando y la ubicación exacta en donde lo está haciendo y enviar la información a un sistema central.
- Un sistema computarizado central que
 - o Tiene la tabla de asignación de ubicaciones a SKU's
 - Lleva el registro del inventario registrando los almacenamientos y recolecciones de SKU en tiempo real.
 - Cuenta con un sistema de ruteo que, cuando se solicita un SKU, permite identificar la ubicación más cercana donde este se encuentra.
- Un sistema de comunicación inalámbrica que permite enviar las indicaciones de almacenamiento/recolección al operador del montacargas en tiempo real por medios inalámbricos. Así mismo, en caso de que a través del lector del montacargas se detecte un error en la ubicación de almacenamiento o recolección le da la señal de alarma para que corrija. Si aún a pesar de esta el operador deja el SKU en cierta posición diferente, registra lo que ocurrió en la realidad para que el sistema de registro del inventario sea confiable.
- Opcionalmente, para maximizar la integridad de los datos, se pueden tener colocados lectores RFID fijos en posiciones estratégicas para validar en tiempo real la existencia de los SKU's y detectar cambios que ocurran por medios distintos al montacargas con lector.



Observe que en el sistema propuesto las etiquetas RFID se colocan solo a nivel de ubicaciones y tarimas, lo que permite que la inversión fuerte en etiquetas sea en la instalación del sistema. Las etiquetas de ubicaciones se adquieren una sola vez y las etiquetas de tarimas se pueden reutilizar, ya sea porque las tarimas son reutilizables o porque las etiquetas se pueden retirar de las tarimas al salir y reusar en otras tarimas. La compra posterior de etiquetas sería solo una pequeña proporción para sustituirlas que se deterioren por el uso.

En la figura 13 se muestra el proceso de almacenamiento de un SKU determinado mediante sistemas de RFID, en el cual cada tarima con un SKU deberá tener adherido una etiqueta que contendrá la información necesaria para su identificación (1), esta etiqueta será leída por un lector RFID inalámbrico (2) el cual estará colocado en el montacargas para tener identificado el producto en todo momento, además este lector enviará la información del SKU a una base de datos.

Este sistema (3) analizará la información recolectada por el lector, para determinar qué tipo de SKU es, así como la ubicación a la que corresponde, a su vez, este sistema calculará la ruta que deberá seguir el recolector con el fin de minimizar distancias, además el sistema realizará una actualización de las existencias de un producto, así como de las próximas ubicaciones disponibles para almacenar los productos entrantes.

A través de tecnología inalámbrica, el sistema comunicará al montacarguista por medio de una diadema (4), la ubicación del producto que se está transportando así como la ruta que deberá seguir para almacenarlo. Esto es realmente útil cuando en un solo viaje se deben almacenar diferentes SKU's, por lo que el sistema calcula la ruta más corta para almacenar todos los productos. Una vez que el producto haya llegado a la ubicación señalada, el lector identifica la etiqueta de dicha ubicación (5), la cual contiene la localización de dicha ubicación, esto para confirmar que realmente el producto ha sido colocado ahí o bien tener la ubicación exacta de dicho SKU.



Para ilustrar un poco mejor la ventaja de poder obtener la ruta de almacenamiento o recolección en un almacén con un sistema RFID implementado, veamos el siguiente ejemplo.

Aunque no es parte del enfoque de esta tesis, el sistema sería además muy útil en el caso de un almacén con recolección múltiple (cuando se deben recolectar más de un solo producto por viaje). En la mayoría de los casos, lo ideal no está en acudir a la ubicación más cercana de cada producto (a), sino en revisar el conjunto de ubicaciones a visitar y planear el viaje al conjunto de ubicaciones en donde los diferentes productos a recolectar estén más cerca entre sí (b), siempre y cuando esto permita una disminución total de la distancia.

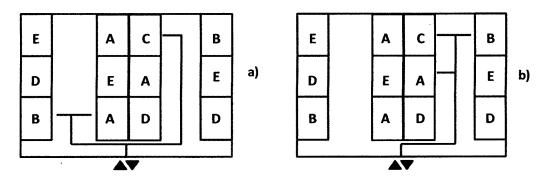


Figura 13. Almacén con productos asignados de manera distribuida

Como se ilustra en la figura 13, se puede observar una disminución de distancias totales en el proceso de almacenar o recolectar diferentes productos en un solo viaje (en este caso los SKU's A, B, y C), este es otro de los beneficios que tendría un sistema RFID en un almacén.



3.4 Número esperado de viajes por cada ubicación de un SKU

Considere un SKU concreto que está siendo almacenado en el almacén de cargas unitarias descrito en los apartados anteriores. Asuma que la demanda del SKU sigue una distribución Poisson con media λ (pza. /Periodo). Asuma que se conoce ya el periodo de revisión R e inventario en pedido máximo S. Dada la capacidad de almacenamiento de cargas unitarias CAP en cada ubicación del almacén el SKU requerirá de un determinado número de ubicaciones.

$$N_{ubic} = \left[\frac{S}{CAP} \right]$$

Entonces se tendrán N_{ubic} ubicaciones asignadas al SKU. A cada una la llamaremos ubicación j del SKU ($j=1...N_{ubic}$). Suponga que para minimizar las distancias de recorrido de almacenamiento y recolección se usa la política de que cuando llega una solicitud de una tarima del SKU se toma siempre de la ubicación más cercana que tenga existencia del mismo. Así mismo, cuando llegan los pedidos de resurtido estos se almacenan primero en la ubicación disponible más cercana. Dado que la demanda del SKU en cada periodo de revisión es aleatoria, las ubicaciones de menor distancia total de almacenamiento/recolección tendrán en promedio un mayor número de visitas que las de mayor distancia.

Analicemos entonces los viajes esperados por celda. Sea NV_j el número de viajes a la ubicación j en un periodo de revisión. Por definición para una variable aleatoria discreta no negativa el valor esperado es

$$E[X] = \sum_{k=1}^{\infty} kP\{X = k\}$$

Entonces el número esperado de viajes a la celda j, durante un periodo R será:

$$E[NVR_j] = \sum_{k=0}^{\infty} kP\{NVR_j = k\}$$



Caso de la ubicación más cercana (j=1)

Sea *DR* la demanda del SKU durante el periodo de revisión *R*. Dado que la ubicación es la más cercana, los primeros viajes que se hagan se harán hacia ella hasta agotar la capacidad *CAP* de la ubicación. Si existen más viajes que la capacidad, se harán a otras celdas. Por tanto el número esperado de viajes a la ubicación 1 (la más cercana) durante un periodo de revisión *R* estará dada por la siguiente fórmula:

$$E[NVR_1] = \sum_{k=0}^{Cap} k * P\{DR = k\} + Cap * P\{DR > k\}$$

Dado que se asume que la demanda sigue una distribución Poisson con tasa λ , entonces la demanda promedio durante el periodo R será λ_R y el valor esperado del número de viajes será:

$$E[NVR_1] = \sum_{k=0}^{Cap} k * \frac{e^{-\lambda R} (\lambda R)^k}{k!} + Cap \left[1 - \sum_{k=0}^{Cap} \frac{e^{-\lambda R} (\lambda R)^k}{k!} \right]$$

Caso de la ubicación j > 1 (la "j-ésima" celda más cercana)

Entonces:

$$E[NVR_{j}] = \sum_{k=0}^{(j-1)^{*}Cap} 0 * P\{DR \le (j-1)^{*}Cap\} + \sum_{k=(j-1)^{*}Cap} [k - (j-1)^{*}Cap] * P\{DR = k\} + Cap * P\{DR > j * Cap\}$$

Simplificando términos tenemos que:

$$E[NVR_{j}] = \sum_{(j-1)Cap+1}^{jCap} [k - (j-1) * Cap] * \frac{e^{-\lambda R} (\lambda R)^{k}}{k!} + Cap \left[1 - \sum_{k=0}^{jCap} \frac{e^{-\lambda R} (\lambda R)^{k}}{k!}\right]$$



Con estas ecuaciones podemos determinar el número esperado viajes a cada ubicación j, para cada diferente SKU's .

Para ilustrar este concepto analizaremos un ejemplo de un SKU cuyo inventario máximo en pedido es 29 unidades. Si la capacidad de cada ubicación es de 3 tarimas se requerirán 10 ubicaciones para ese SKU. Asumiendo un periodo de revisión de una semana y una demanda Poisson con tasa de 12 unidades/semana el número esperado de visitas a cada una de las celdas (ordenadas de más cercana a menos cercana) será como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Número esperado de viajes por celda durante un periodo de revisión

Como se observa, La ubicación uno será visitada hasta agotar su capacidad (3) en prácticamente todos los periodos por lo que el número esperado de viajes es prácticamente 3. El número esperado de viajes va disminuyendo para las demás ubicaciones a medida que se encuentran más alejadas de los puntos de entrada y salida hasta llegar a valores esperados cercanos a cero en las últimas ubicaciones.



3.5 Almacenamiento Dedicado Distribuido

La gráfica 14 del apartado anterior ilustra el comportamiento del número de viajes a cada una de las celdas asignadas a un mismo SKU. Para las primeras celdas el número de viajes por periodo de revisión será casi igual a su capacidad, mientras que para las últimas el número esperado de viajes será significativamente menor.

Esto hace evidente que, cuando se desea minimizar la distancia total recorrida en los procesos de almacenamiento y recolección en un almacén la asignación de ubicaciones adyacentes para todas las celdas de un mismo SKU será muy ineficiente. Lo razonable sería asignar las primeras celdas en posiciones cercanas a la entrada/salida y las últimas celdas en las más lejanas para dar oportunidad de asignar ubicaciones cercanas a las primeras celdas de otros SKU's lo que generaría una asignación de ubicaciones dedicada pero distribuida.

Cuando se tienen diversos SKU's se debiese calcular el número esperado de viajes por unidad de tiempo para cada una de las cedas de cada SKU y asignar sus lugares en función descendiente del número de viajes.

Esto está plasmado en la siguiente regla propuesta para la asignación de ubicaciones a un SKU.

Regla de asignación para estrategia de almacenamiento dedicado distribuido en un almacén de cargas unitarias con demanda Poisson.

Paso 1: Calcule el número esperado de viajes por unidad de tiempo a la "¡"esima celda asignada al SKU / de la siguiente manera:

$$E[NV_{ij}] = \frac{1}{R_i} \left[\sum_{(j-1)Cap+1}^{jCap} [k - (j-1) * Cap] * \frac{e^{-\lambda_i R_i} (\lambda_i R_i)^k}{k!} + Cap \left[1 - \sum_{k=0}^{jCap} \frac{e^{-\lambda_i R_i} (\lambda_i R_i)^k}{k!} \right] \right]$$



Donde:

 $E|NV_{ii}|$: Número de viajes esperado para la ubicación j, del SKU i.

 R_i : Periodo de revisión R_i , para un SKU i.

Cap : Capacidad de las ubicaciones.

 λ_i : Tasa de llegada promedio de la demanda (Poisson).

k : Cantidad de pedidos del cliente

Paso 2: Asigne las ubicaciones del almacén de menor distancia de viaje total (almacenamiento más recolección) a las combinaciones SKU i, celda j con mayor valor esperado de número de viajes por unidad de tiempo $E[NV_{ij}]$.

La regla anterior busca minimizar las distancias totales recorridas durante el proceso de almacenamiento y recolección de productos. En general esta técnica hará que las ubicaciones más cercanas a las puertas de entrada y salida de material se visiten más frecuentemente que las celdas que están más alejadas.

En la siguiente figura se puede observar los valores de $E[NV_{ij}]$ para 4 SKU's diferentes.

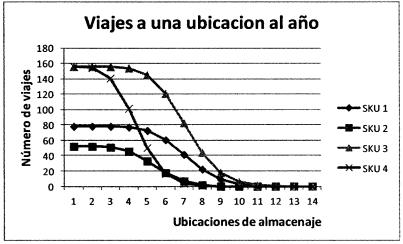


Figura 15. Grafica del número de viajes por producto



La regla de asignación asignaría las ubicaciones, de más a menos cercana, de la siguiente manera (SKU, ubicación):

Teniendo ordenadas las ubicaciones de menor a mayor distancia, se asignaría las dos primeras ubicaciones al SKU3, la siguiente al SKU 4, y así sucesivamente hasta terminar con el número de ubicaciones a asignar. El acomodo de las primeras 28 ubicaciones quedaría tal y como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 3 Asignación de ubicaciones de una estrategia dedicada distribuida

Ubicación	E[Nvij]	SKU	Ubicación	E[Nvij]	SKU
1	156.00	3	15	77.03	1
2	156.00	3	16	72.54	1
3	155.97	4	17	60.46	1
4	155.84	3	18	52.00	2
5	154.43	4	19	51.93	2
6	154.07	3	20	50.91	2
7	145.08	3	21	50.46	4
8	140.90	4	22	45.53	2
9	120.92	3	23	44.11	3
10	101.34	4	24	41.32	1
11	82.64	3	25	32.99	2
12	78.00	1	26	22.05	1
13	78.00	1	27	18.04	3
14	77.92	1	28	17.66	2

En el capítulo siguiente evaluaremos el desempeño de la estrategia de almacenamiento dedicado distribuido en comparación con las técnicas más comunes de almacenamiento



Capitulo 4 Evaluación del método propuesto

Para evaluar la bondad de la estrategia de almacenamiento dedicado distribuida propuesta en el capítulo anterior se llevó a cabo un estudio comparativo mediante simulación de eventos discretos contra dos de las estrategias de almacenamiento más utilizadas:

- Almacenamiento dedicado concentrado: El cual se asignaran celdas adyacentes a cada SKU's permitiendo que estén concentrados, la asignación se realizará de acuerdo al número de visitas por SKU.
- Almacenamiento aleatorio: Para el cual se simulará la llegada de los SKU's de manera aleatoria para poder asignarlos a las ubicaciones más cercanas disponibles.

La comparación se llevo a cabo bajo 4 diferentes configuraciones (layout) de almacenes. Para llevar a cabo el estudio se desarrolló un programa en Scilab. A continuación se presentan los detalles del programa.

4.1 Descripción del modelo de simulación

4.1.1 Parámetros de entrada

Analizaremos un almacén de cargas unitarias, en donde se almacenan 15 diferentes productos, cada uno con su respectiva demanda y sus tiempos de resurtido, descritos en la tabla 3.

Tabla 4. Demandas y tiempos de resurtido de los 15 productos

	Información de los productos													-	
SKU's	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Demanda	10	5	20	12	9	3	6	20	6	3	2	5	11	8	15
T. resurtido	1	2	2	5	1	1	2	5	2	2	5	5	3	3	2
Costo unitario	10	5	7	15	3	2	12	10	11	5	4	12	10	8	12



La simulación se puede dividir en 2 partes, en la primera se calculan los parámetros óptimos para una estrategia de administración de inventarios por revisión periódica para cada SKU i (periodo de revisión R_i e Inventario máximo en pedido S_i) por ser una de las estrategias más usadas en la práctica. Para esto se usó el modelo de ventas perdidas el modelo tomando en cuenta los parámetros de la tabla 4 que nos ayuden a gestionar los inventarios.

Tabla 5. Parámetros de entrada

Información del la empresa							
Tasa de interés	20%						
Costo Venta Perdida	25%						
Costo Ordenar (miles)	0.5						
Capacidad de Celda	3 unidades						

Como se menciona en la tabla anterior, la tasa de interés manejada es de un 20%, el costo de ordenar es de \$500 sin importar la cantidad de artículos en el pedido, mientras que el Costo de venta perdida (*CVP*), es del 25% del costo de cada producto que no se tenga en inventario para satisfacer un pedido del cliente. En este modelo se tomará en cuenta que cada celda o ubicación, tiene capacidad para almacenar 3 tarimas, con la única restricción es que estas 3 unidades deberán de ser del mismo SKU.

4.1.2 Revisión Periódica

Lo primero que realiza el modelo de simulación es calcular las métricas para cada uno de los productos. Se iniciará con el cálculo del EOQ para calcular cual será el periodo de revisión que estaremos tomando para los productos.

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{iC}}$$
 R = Q / D

Donde Q, será la cantidad óptima de pedido y R es el tiempo o periodo de revisión en el que se estarán midiendo los niveles de inventario y pidiendo las cantidades correspondientes de cada producto.



El siguiente paso que realiza el modelo es el cálculo de la probabilidad de desabasto, mide cual es la probabilidad óptima de desabasto que se utilizará para el cálculo del nivel de inventario. En este caso estamos asumiendo que en caso de que no exista inventario disponible para satisfacer los requerimientos del cliente, la venta se perdería, por lo que necesitamos encontrar un nivel óptimo de inventario que nos permita satisfacer los requerimientos de los clientes la mayor parte del tiempo sin tener que incurrir en costos por exceso de inventario.

Debido a esto calcularemos la probabilidad óptima de desabasto que nos permita conocer hasta que porcentaje de las veces es conveniente tener inventario en el almacén. Esto se puede observar mejor en la siguiente gráfica.

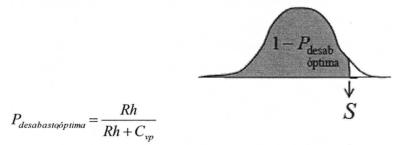


Figura 16. Probabilidad de desabasto óptima

A partir de esta probabilidad de desabasto óptima calcularemos el nivel de inventario óptimo mediante una distribución Poisson. De igual manera como se muestra en la figura 3.1, la cantidad máxima de inventario a almacenar por cada uno de los productos será igual a la cantidad de unidades para cubrir la demanda en donde la probabilidad sea 1 - P desabasto óptima.

Otra manera de calcular el inventario máximo es utilizando la siguiente ecuación revisada anteriormente,

$$S^* = D(R+L) + z(\sigma_D \sqrt{R+L})$$

En donde D, es igual a la demanda de un determinado producto, R es el tiempo de resurtido, L el tiempo de entrega del proveedor, y dado que es una distribución Poisson, tenemos que $\sigma = \sqrt{\lambda}$



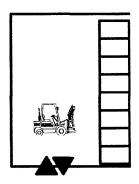
Una vez determinado el número máximo de inventario aue almacenar para cada producto, es necesario revisar cuantas celdas destinarán a cada uno de ellos, con el fin de tener un estimado de la cantidad total de espacio de un almacén que será destinado para almacenamiento de los productos.

Después de este cálculo es fácil determinar cuál será el espacio mínimo requerido para el almacenamiento de los productos, esta deberá ser una consideración importante al determinar el tamaño de un almacén, y pronosticar crecimientos futuros de acuerdo al comportamiento de la demanda.

4.1.3 Configuraciones del lay out y cálculo de distancias

El modelo de simulación fue diseñado cubrir distintos para configuración de lay out en un almacén, esto para poder revisar y comparar obtenidos estrategias diferentes resultados con las actuales almacenamiento con la estrategia propuesta, y comparar porcentajes de eficiencia.

Se presentan a continuación las cuatro configuraciones más comunes en la literatura sobre las cuales haremos las comparaciones de distancias:





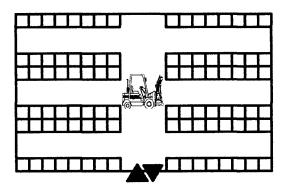


Figura 18 Almacén Pasillos horizontales



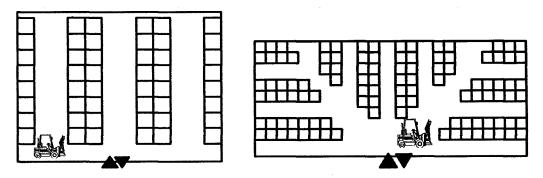


Figura 19. Almacén Pasillos verticales

Figura 20. Almacén pasillos angulados

4.1.4 Consideraciones generales

Para poder realizar el cálculo de distancias sobre la cual se medirán los beneficios de la estrategia de almacenamiento propuesta, se revisarán primero una serie de consideraciones que se tomaron en cuenta en el lay out.

Los siguientes datos son parámetros de entrada que necesita el modelo para poder calcular las distancias de una determinada celda del almacén, hacia la puerta de recepción y salida de material, lo cual nos permitiría conocer las distancias de cada viaje hacia esa celda, y así mismo obtener las distancias totales recorridas durante la simulación.

La figura 3.6, muestra las dimensiones de una tarima estándar las cuales fueron utilizadas en la simulación, otro parámetro fue el de dejar un espacio entre tarimas de 10cm, el cual en un almacén típico sería necesario para evitar que las tarimas sufrieran algún daño al momento de acomodar o recolectar el producto.



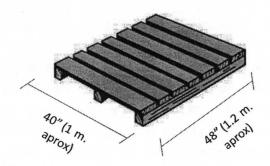


Figura 21. Tarima estándar

Otro punto a considerar es el ancho del pasillo, esto generalmente depende del tipo de montacargas, y de las características del producto a almacenar, sin embargo un montacargas estándar que puede levantar de 5tn a 7tn, necesita un pasillo de 3.7m, para poder maniobrar adecuadamente en el almacén, por lo que se tomó en cuenta esta distancia para el diseño de pasillos de cada una de las cuatro configuraciones de lay out.

4.1.5 Cálculo de distancias

El modelo calcula las distancias aproximadas de cada configuración antes vista, de acuerdo a la siguiente formula la cual fue desarrollada para este propósito, el modelo es capaz de asignar las distancias a cada celda diferenciando primero el tipo de almacén con el que se está trabajando, esto lo hace mediante algunos datos de entrada los cuales son conocidos o fáciles de determinar (sin embargo esta fórmula no aplica para la configuración de pasillos angulados):

$$Dist = ||A_i - \widetilde{A}| + h(A_j - 1/2)| * [a + 2C(\ell + z) - \ell] + a/2 + n(z + \ell) + a$$



> Tipo de almacén

La primera parte de la ecuación sirve para identificar qué tipo de almacén es el que estamos analizando. En donde A_h es el número de pasillo i, en donde se encuentra esta celda, y \widetilde{A} es la "mediana" de la cantidad de pasillos totales "verticales" con los que cuenta el almacén. Mientras que A_h es el número de pasillo horizontal en donde se encuentra la celda, siempre y cuando este sea un almacén con pasillos horizontales, y h es igual a uno si es un almacén con pasillos horizontales, ó igual a cero si es un almacén con pasillos verticales.

De esta manera tenemos que:

$$A_i - \widetilde{A} + h(A_j - 1/2)$$
 Si se tratase de un almacén con orientación vertical $A_i - \widetilde{A} + h(A_j - 1/2)$ Si se tratase de un almacén con orientación horizontal

Primero empezaremos por determinar la cantidad de pasillos que nos interesan de un almacén, estos son aquellos que sirven para realizar el almacenamiento o recolección directa de un producto, sin contar los pasillos centrales (middle cross aísles), que se utilizan solo para facilitar el traslado entre pasillos. En la figura 3.7 observamos que solo tenemos 3 pasillos de acceso directo a las ubicaciones.

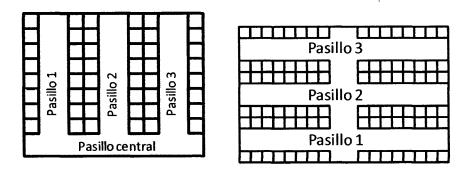


Figura 22. Pasillos en almacenes verticales y horizontales



Para determinar en qué pasillo se encuentra una determinada celda, se empezará por determinar cuántas celdas contiene cada pasillo, el cual el modelo lo calculará mediante la siguiente ecuación:

$$Num.Celdas.Pasillo = \frac{Celdas.Totales}{Pasillos.totales}$$

En donde las *Celdas Totales* son la cantidad de celdas dedicadas a almacenamiento, que contiene el diseño del almacén, de igual manera los pasillos totales, es la cantidad de pasillos para almacenaje con los que cuenta el diseño del almacén, esto sin contar los pasillos centrales (middle cross aísles), que se utilizan solo para facilitar el traslado entre pasillos.

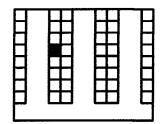


Figura 23. Celdas por pasillo

En la figura anterior, se puede apreciar que ese diseño de almacén cuenta con 48 celdas de almacenamiento, y 3 pasillos, los cuales son parámetros conocidos, en este caso el modelo de simulación, realiza el cálculo de celdas por pasillo, asignando en este caso el número de celdas del 1 al 16 a las que se encuentran en el primer pasillo, los números del 17 al 32, las que se encuentran en el segundo pasillo y del 33 al 48 las del tercer pasillo (los pasillos son ordenados de izquierda a derecha).

> Distancia entre pasillos

La ecuación anterior de cálculo de distancias, también determina la distancia de recorrido entre un pasillo y otro hasta llegar al pasillo en donde se encuentra una celda determinada.

$$[a+2C(\ell+z)-\ell]$$
 Distancia entre pasillos



En donde a, es el ancho que mide un pasillo (se tomó 3.7m de ancho para cada pasillo), C es la capacidad de la celda, la cual habíamos mencionado que para la simulación sería de 3 unidades (tarimas), ℓ es el espacio que se deja entre una tarima y otra, y z es la medida de una tarima estándar, (se toma 1m debido a que por ese lado es por donde entra el montacargas). La distancia entre las ubicaciones es de 10 cms.

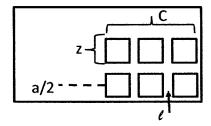


Figura 24. Distancia de un pasillo a otro

Distancia del pasillo a la celda

Como se mencionó anteriormente, a es el ancho del pasillo, por lo que el montacargas recorre la mitad de este, una vez que llega al producto. a/2

Distancia a la celda

Una vez que el montacargas esta en el pasillo correcto, esta parte de la ecuación determina cual es la distancia que existe de acuerdo al número de celda a la que realiza la visita, en donde n es dicho número de celda. Es decir si n=5 esta fórmula sumará las distancias que hay desde la celda 1 hasta la 5 a la cual estaremos realizando el viaje.

$$n(z+\ell)+a$$

Sin embargo, esta aproximación funciona solamente si el almacén tiene una orientación vertical o una horizontal, para la configuración de pasillos angulados se utilizó el programa de Autocad para determinar las distancias de cada celda, las cuales fueron introducidas directamente al modelo.

El modelo genera un vector renglón con el número de celda y su respectiva distancia, este vector tiene un tamaño n, dependiendo de la cantidad de celdas para almacenamiento que contenga el almacén.



Para esto el número de celda inicia con la primer celda del pasillo que este más a la izquierda en un almacén con pasillos verticales, o de abajo hacia arriba si se trata de un almacén con pasillos horizontales.

En el modelo existe la variable "configuracion", la cual indica el tipo de lay out del almacén que estamos analizando para el cálculo de distancias, esta variable tiene valores entre 1 y 4 siendo:

- 1.- Almacén Pasillo único
- 3.- Almacén pasillos horizontales
- 2.- Almacén pasillos verticales
- 4.- Almacén pasillos angulados

4.1.6 Estrategia de almacenamiento

En el modelo programado, se compararan tres estrategias de almacenamiento, en las cuales se analizarán los resultados de la simulación, y se revisarán las distancias obtenidas en cada uno de ellos, en las cuatro distintas configuraciones de almacenes mencionadas anteriormente.

a) Almacenamiento dedicado concentrado

Como se menciona, esta estrategia de almacenamiento es dedicada, cada producto ya tiene asignado una celda y con la característica de que todos los productos del mismo tipo deberán ubicarse juntos físicamente, es decir, en celdas contiguas.

Para esto se calcula el número de viajes de cada producto, de acuerdo a su demanda y a la cantidad de celdas totales que ocupa para su almacenamiento en el almacén.

NviajesSKU(i) = DemSKU(i)/NCelSKU(i)

Después se ordenan los productos de mayor a menor número de viajes, para así poder asignar las celdas más convenientes a los productos con un mayor volumen de viajes y poder darles prioridad.



b) Almacenamiento aleatorio (ubicación más cerca disponible)

Esta estrategia de almacenamiento es de tipo aleatoria, el modelo genera una cantidad de números aleatorios, dependiendo de la cantidad a productos diferentes que se necesiten almacenar, después cada uno de estos es almacenado de tal forma que el primer producto que llegue se concentra en la mejor celda disponible, y así sucesivamente hasta terminar con los productos de ese mismo tipo, después se genera aleatoriamente el siguiente tipo de producto y así hasta haber asignado todas las celdas a todos los productos.

Esta estrategia de almacenamiento permite que no todos los productos queden de manera contigua, ya que el ordenamiento se realiza de acuerdo a la celda más cercana a la puerta, lo que permite que los productos queden dispersos.

b) Almacenamiento dedicado distribuido

Este tipo de almacenamiento, como bien se comentó, consiste en obtener el número de viajes esperadas de cada una de las celdas asignadas a los productos y a partir de ahí, asignar las celdas más cercanas a la puerta de recepción y salida de materiales, los productos que tengan los valores esperados más altos. De este modo obtenemos un almacén con productos asignados de manera distribuida en donde el mayor número de viajes se realizarán en las celdas más cercanas.

Para cada una de estas estrategias el modelo registra una matriz llamada AsigSKU, la cual contendrá la asignación inicial de cada producto, es decir, el número de todas aquellas celdas en donde se estará almacenando dicho producto.



4.1.7 Generación de órdenes del cliente

Se tomará una probabilidad Poisson, para calcular la tasa de llegada de las órdenes del cliente, para esto se construyó una tabla de probabilidad acumulada para que al generarse un número de manera aleatoria entre 0 y 1, se pudiera generar un pedido de acuerdo al rango en el que cayera el valor. Esta tabla se calculó para cada producto, por lo que las demandas eran diferentes.

Prob.acum. =
$$\frac{e^{-\lambda}\lambda}{k!}$$
 k= 0, 1, 2... maxDem

En donde la máxima demanda diaria que se pudiera tener, se limitó a 6 veces la desviación estándar, al ser una distribución Poisson se conoce que la $\sigma=\sqrt{\lambda}$. Por lo tanto:

$$\max Dem = Dem + 6\sqrt{Dem}$$

Esto se realiza para cada uno de los productos, con estos datos se obtuvo la demanda diaria durante toda la simulación la cual era completamente aleatoria.

4.2 Simulación del comportamiento del almacén e inventarios

Para hacer la comparación de cada configuración se corrieron 10 réplicas, de 1000 días de operación del almacén cada una y se calcularon la media y el medio intervalo de confianza (al 90% de confiabilidad) de la distancia total recorrida con cada estrategia de almacenamiento. Se verifico que el medio intervalo de confianza fuese suficientemente pequeño para que las diferencias entre las respuesta observadas fueran estadísticamente significativas.

Los 1000 días de duración de la réplica son casi 3 años, durante este tiempo, el almacén ya vació y asigno cada uno de sus productos un número considerable de veces, por lo que es tiempo suficiente para determinar si existen beneficios con la metodología propuesta.



Para iniciar la corrida del modelo empezaremos en el día=0, esto para que al inicio de la simulación se supondrá que se tiene el inventario a su máximo nivel. Así mismo todas las demás variables que intervienen en el modelo, se inician en 0, tales como distancia total obtenida, ventas de los productos, número de viajes reales a cada celda, pedidos de productos, etc.

Se uso la técnica de reducción de varianza conocida como "Common Random Numbers" en la cual en cada réplica se usa la misma semilla aleatoria para cada estrategia para que la variabilidad de los resultados no se deba al conjunto de número aleatorios usado sino a la estrategia de almacenamiento. Cada réplica usa semillas aleatorias distintas.

a) Simular demanda y actualizar existencias

El modelo de simulación inicia con la generación de números aleatorios para determinar la demanda diaria de cada uno de los productos, la cual quedará registrada para futuras estadísticas. Después se revisa si existe inventario disponible de cada producto para satisfacer el pedido del cliente.

En caso de tener inventario, el modelo revisa cada una de las celdas y recolecta el producto de cada una de ellas hasta completar el pedido, empezando por las celdas cuya distancia a la puerta sea menor.

Se registra la venta del producto, y se actualiza tanto el inventario físico como el inventario total (Inventario físico + inventario en pedido - inventario comprometido). En caso de no haber inventario suficiente, se vende solo lo que se tiene disponible y la cantidad de producto que no se pudo satisfacer de la orden del cliente, se registra como venta perdida.

b) Verificar si llega pedido y ubicarlo en el almacén

Habiendo transcurrido el primer periodo de revisión de inventarios el modelo revisa los días en que el pedido de producto al proveedor, estará llegando al almacén (esto de acuerdo a los tiempos de resurtido de cada producto). Si el día de llegada del pedido es igual al día de la simulación, se genera una variable llamada *Cantporasignar*, la cual será igual a la cantidad de pedido que se ha recibido en el almacén, esto se hará para cada producto.



Una vez que se ha creado la variable *Cantporasignar*, lo siguiente es ubicarlo en el almacén. En el caso de las estrategias de almacenamiento dedicado concentrado como en el dedicado distribuido, las celdas que se tenían asignadas no cambian, por lo que el modelo empieza por almacenar las unidades de cada producto en las celdas más cercanas, hasta terminar de asignar el total de unidades de un determinado producto.

Sin embargo en el aleatorio, el modelo empieza a almacenar los productos de acuerdo al orden de llegada (para esto se genera un número aleatorio entre los productos que llegaron durante el día), y hace una reasignación de celdas de cada producto siempre y cuando estas estén vacías.

Después acomoda el producto a la ubicación más cercana disponible, y así sucesivamente hasta terminar con todos los productos.

Después de reabastecer las celdas de cada producto se hacen una actualización del inventario, tanto inventario físico, como inventario total. Para cada uno de estos viajes de recolección de inventario como los de almacenamiento, el modelo va sumando las distancias que se recorren en cada traslado, dependiendo la celda a la que se haya visitado.

Se ordena la matriz de celdas de menor a mayor distancia total, de tal manera que en la siguiente orden del cliente, se pueda seleccionar el producto de la celda más cercana sin importar que exista producto que lleva más tiempo en el almacén.

b) Verificar para cada producto si toca pedir y hacerlo

Se verifica el periodo de revisión de cada producto R, si este coincide con el día actual de la simulación, entonces se realiza el pedido. Este pedido será igual a la diferencia del inventario máximo de cada producto S y el inventario actual de cada producto.

Después se actualiza el día de llegada de pedido, lo cual se hace sumándole el tiempo de reposición al día en el que se hace el pedido de cada producto al proveedor. También se actualiza el inventario total al cual se le suma el inventario en pedido que acabamos de generar.



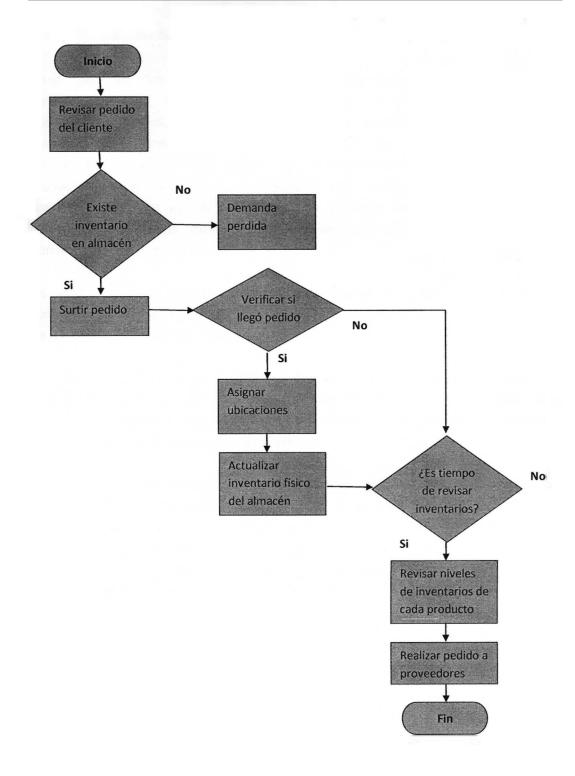


Figura 25. Diagrama del modelo de simulación



4.3 Resultados de la Simulación

Cada una de las estrategias revisadas anteriormente, tiene una amplia aplicación práctica, y han sido muy estudiadas en la literatura, es por eso que en este estudio a través del modelo de simulación se compararán un almacenamiento Dedicado concentrado, en donde los productos se ordenaron de acuerdo al volumen de ventas, un almacenamiento aleatorio, el cual los productos fueron asignados a la ubicación más cercana disponible, y nuestra estrategia propuesta de un almacenamiento dedicado distribuido en el cual las celdas más cercanas fueron asignadas de acuerdo a la probabilidad del número de viajes esperados.

Se evaluaron cada una de estas tres estrategias de almacenamiento en las cuatro configuraciones de almacén diferentes, esto para tener una mejor base de comparación en cada tipo de almacén.

Para cada uno de estos escenarios se evaluaron 10 instancias diferentes, asignándole una "semilla" a cada instancia, de tal manera que para cada uno de los diferentes estrategias de almacenamiento se generaran los mismos valores aleatorios y eliminar la variabilidad.

Se analizará primeramente el comportamiento de los inventarios bajo una revisión periódica, revisar el comportamiento de la demanda, así como algunos indicadores que nos permitirán tener un mejor análisis de la administración de inventarios (revisar Anexo 1),

- a) Nivel máximo de inventario de cada producto
- b) Inventario Promedio
- c) Rotación de inventarios por producto
- d) Días de inventario
- e) Nivel de servicio

Revisaremos primeramente el comportamiento de los niveles de inventario, tomando en cuenta los parámetros de entrada conocidos, que utilizamos para la simulación.



Tabla 6. Datos de cada producto

	Parametros de entrada para cada SKU										
	1	2	3	4	5	6	7	8			
Demanda semanal	10	5	20	12	9	3	6	20			
Costo (miles)	\$10	\$5	\$7	\$15	\$3	\$2	\$12	\$10			
T. Resurtido (días)	3	2	3	4	2	1	2	1			
C.V. perdida (miles)	\$2.50	\$1.25	\$1.75	\$3.75	\$0.75	\$0.50	\$3.00	\$2.50			

	9	10	11	12	13	14	15
Demanda semanal	6	3	2	5	11	8	15
Costo (miles)	\$11	\$5	\$4	\$12	\$10	\$8	\$12
T. Resurtido (días)	2	1	1	3	3	4	4
C.V. perdida (miles)	\$2.75	\$1.25	\$1.00	\$3.00	\$2.50	\$2.00	\$3.00

Después de estos parámetros, el modelo de simulación calcula las siguientes medidas para la revisión de inventarios de manera periódica como ya se mencionó anteriormente.

Tabla 7. Revisión periódica por producto

	Parametros de Revisión periodica											
	1	2	3	4	5	6	7	8				
EOQ	16	16	27	14	28	20	11	23				
Periodo Rev. R	2	3	1	1	3	7	2	1				
Demanda en R	24	16	29	19	30	21	14	23				
Prob Desabasto	3.0%	4.4%	1.5%	1.5%	4.4%	9.7%	3.0%	1.5%				
Inv. Maximo S	34	24	41	29	39	28	21	34				
Celdas por SKU	12	8	14	10	13	10	7	12				

发展。 经验基础	9	10	11	12	13	14	15
EOQ	12	12	11	10	17	16	18
Periodo Rev. R	2	4	6	2	2	2	1
Demanda en R	14	12	12	12	27	21	24
Prob Desabasto	3.0%	5.8%	8.5%	3.0%	3.0%	3.0%	1.5%
Inv. Maximo S	21	18	17	19	37	30	35
Celdas por SKU	7	6	6	7	13	10	12

Se simuló un total de 1000 días, para poder medir las distancias de traslados totales recorridas en el almacén, y se puedo observar también el comportamiento de los inventarios.



A continuación se muestra una tabla con los datos obtenidos de la simulación:

Tabla 8. Resultados en administración de inventarios

	1	2	3	4	5	6	7	8
Inv. Maximo S	34	24	41	29	39	28	21	34
Inv. Promedio	20.6	16.0	22.1	15.8	22.3	16.8	13.1	21.4
Ventas (pzas)	1333	629	2936	1759	1365	443	880	2807
Venta perdida	0	2	0	1	7	0	5	4
Rotación de Inv/año	24	14	48	41	22	10	24	48
Días Inventario	15	25	8	9	16	38	15	8
Nivel de Servicio	100%	99.7%	100%	99.9%	99.5%	100%	99.4%	99.9%

	9	10	11	12	13	14	15
Inv. Maximo S	21	18	17	19	37	30	35
Inv. Promedio	13.8	11.8	10.9	11.5	21.4	17.6	18.7
Ventas (pzas)	817	417	283	737	1586	1118	2204
Venta perdida	0	3	4	4	5	0	5
Rotación de Inv/año	22	13	9	23	27	23	43
Días Inventario	17	28	39	16	13	16	8
Nivel de Servicio	100%	99.3%	98.6%	99.5%	99.7%	100%	99.8%

Revisaremos cada una de las estrategias de almacenamiento, para analizar las distancias que se obtuvieron en cada uno de ellos, y así poder compararlos y tener una base para ver si con la estrategia propuesta hubo alguna mejora en cuanto a la distancia recorrida debido a las diferentes maneras de asignar productos en el almacén.

A continuación se muestra la distancia total recorrida para cada estrategia de almacenamiento en cada réplica así como la media y el medio intervalo de confianza al 90%.

Cabe mencionar que para cada tipo de configuración del almacén, se calcularon las medias y desviaciones estándar, así como el *MIC*, medio intervalo de confianza para poder afirmar con un 90% de confiabilidad que la estrategia de almacenamiento dedicada da mejores resultados que las estrategias más utilizadas.



Tomando esto en consideración tenemos los siguientes promedios de las distancias en cada configuración. Los ahorros fueron calculados en base a la distancia de un almacenamiento dedicado concentrado, ya que en este caso, esta estrategia fue la que obtuvo la mayor distancia total recorrida en cada una de las configuraciones.

Tabla 9. Ahorros de distancias Layout un solo pasillo

Tipo de almacenamiento	Media	MIC	Ц	LS	Ahorros
Dedicado Concentrado	4,829,902	25,528	4,804,373	4,855,430	
Dedicado Distribuído	3,310,717	21,071	3,289,646	3,331,788	31.5%
Aleatorio	4,160,629	38,800	4,121,829	4,199,429	13.9%
Aleatorio ubicación más cercana	3,502,338	21,499	3,480,839	3,523,837	27.5%

Tabla 10 Ahorros de distancias Layout pasillos verticales

Tipo de almacenamiento	Media	MIC	Ш	LS	Ahorros
Dedicado Concentrado	1,703,137	8,154	1,694,982	1,711,291	-
Dedicado Distribuido	1,459,124	7,109	1,452,015	1,466,233	14.3%
Aleatorio	1,763,531	7,065	1,756,466	1,770,596	-3.5%
Aleatorio ubicación más cercana	1,499,222	6,978	1,492,244	1,506,200	12.0%

Tabla 11 Ahorros de distancias Layout pasillos horizontales

Tipo de almacenamiento	Media	MIC	U	LS	Ahorros
Dedicado Concentrado	1,504,826	7,477	1,497,349	1,512,304	-
Dedicado Distribuido	1,282,834	6,138	1,276,696	1,288,972	14.8%
Aleatorio	1,744,993	11,106	1,733,887	1,756,099	-16.0%
Aleatorio ubicación más cercana	1,329,585	5,694	1,323,891	1,335,279	11.6%

Tabla 12 Ahorros de distancias Layout pasillos angulados

Tipo de almacenamiento	Media	MIC	н	LS	Ahorros
Dedicado Concentrado	1,659,252	9,155	1,650,097	1,668,407	-
Dedicado Distribuido	1,490,110	8,825	1,481,285	1,498,935	10.2%
Aleatorio	1,769,283	10,873	1,758,410	1,780,156	-6.6%
Aleatorio ubicación más cercana	1,539,691	33,679	1,506,011	1,573,370	7.2%



De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede apreciar como un almacenamiento dedicado distribuido obtuvo al final del periodo de análisis, una distancia total de recorridos menor que una estrategia de asignación aleatoria.

Cabe mencionar que solo se muestra información de uno de los escenarios analizados, en total se hicieron 3 diferentes cambiando la información de demandas de cada SKU, la cual se detalla en el apartado de anexos.

Como se ilustra en las tablas anteriores se muestran los cálculos obtenidos para la media y los intervalos de confianza para cada una de las estrategias de almacenamiento. Dado que se puede apreciar que en ninguno de los casos, los intervalos de confianza de cada estrategia caen dentro del rango de cualquier otra, podemos afirmar con un 90% de confianza que la estrategia de un almacenamiento dedicado distribuido es mejor que las otras dos estrategias analizadas y que tiene una reducción en la distancia total recorrida en los procesos de almacenamiento y recolección de los productos.

De esta manera se puede afirmar con el 90% de confianza que en un almacén de cargas unitarias el almacenamiento dedicado distribuido tiene un ahorro del 14% al 31% con respecto al almacenamiento dedicado concentrado, de acuerdo a los 4 diferentes tipos de configuraciones de layout analizados. Esto se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 13 Ahorros del almacenamiento dedicado vs aleatorio ubicación más cercana

Distancias por layout						
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4		
Dedicado Distribuido	3,310,717	1,459,124	1,282,834	1,490,110		
Dedicado Concentrado	4,829,902	1,703,137	1,504,826	1,659,252		
Ahorro	31.45%	14.33%	14.75%	10.19%		

Sin embargo en cuanto a la tabla 14, podemos observar los ahorros que se obtuvieron comparándolos con el almacenamiento aleatorio a la ubicación más cercana, el cual obtuvo la menor distancia de traslados después del almacenamiento distribuido. Estos ahorros van desde el 2.6% al 5.47%, dependiendo del tipo de configuración analizada.



Tabla 14 Ahorros del almacenamiento dedicado vs aleatorio ubicación más cercana

Distancias por layout						
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4		
Dedicado Distribuido	3,310,717	1,459,124	1,282,834	1,490,110		
Aleatorio ubicación más cercana	3,502,338	1,499,222	1,329,585	1,539,691		
Ahorros	5.47%	2.67%	3.52%	3.22%		

Esto se puede entender dado que el almacenamiento aleatorio tiene la desventaja de asignar un pedido completo de un solo producto a las mejores celdas disponibles, sin embargo cuando el producto que se asignó tiene poca demanda, estará más tiempo que los demás productos ocupando un lugar que está muy cerca de la puerta de salida de materiales, debido al movimiento o rotación de ese producto.

Mientras que en la asignación de productos de manera distribuida, esto no ocurre, ya que las celdas más cercanas a la puerta de recepción y salida de materiales, no tienen por qué ser asignadas a un solo producto, sino que con esta estrategia, obtenemos la probabilidad del número de viajes esperados para cada producto de acuerdo a su demanda. Lo que nos permite ordenarlos de manera decreciente para asegurar que las celdas con menor distancia sean asignadas a aquellos productos o cantidades de productos que tengan el mayor movimiento en el almacén.

Además de los distintos tipos de configuraciones se analizaron diferentes escenarios para verificar el beneficio de cada una de las estrategias de almacenamiento contra la estrategia propuesta de almacenamiento distribuido. Estos tipos de escenario se hicieron cambiando el costo de venta perdida *CVP*, además de variar la información tanto de los datos de la demanda así como el tiempo de resurtido de cada SKU. Esta información se puede revisar en los anexos.

Hausman (1976) demuestra que la estrategia de almacenamiento a la ubicación más cercana en comparación con una estrategia completamente aleatoria, tienen el mismo desempeño siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones



Analizando la información completa de los distintos escenarios cabe mencionar que el almacenamiento aleatorio a la ubicación más cercana no siempre es la mejor estrategia comparándola con el almacenamiento dedicado por volumen de visitas, dado que esto depende de los datos de la demanda y tiempos de resurtido de cada SKU.

Como se mencionó anteriormente se analizaron 3 diferentes escenarios en los cuales los beneficios entre las estrategias analizadas son muy diferentes, y en los que podemos observar que la estrategia de almacenamiento a la ubicación más cercana no siempre es mejor que la de almacenamiento dedicado, sin embargo la estrategia propuesta de almacenamiento distribuido muestra un ahorro aún mayor que en el escenario anterior.

Tabla 15 60% de la demanda concentrada en el 20% de los productos

Distancias por layout						
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4		
Dedicado Distribuído	3,065,209	1,407,272	1,235,680	1,484,222		
Aleatorio ubicación más cercana	3,596,701	1,518,603	1,348,194	1,564,082		
Ahorros	14.78%	7.33%	8.35%	5.11%		

Distancias por layout						
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4		
Dedicado Distribuido	3,065,209	1,407,272	1,235,680	1,484,222		
Dedicado Concentrado	4,318,784	1,618,475	1,455,198	1,654,015		
Ahorros	29.03%	13.05%	15.09%	10.27%		

Tabla 16 80% de la demanda concentrada en el 20% de los productos

Distancias por layout						
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4		
Dedicado Distribuido	2,558,511	1,341,545	1,178,225	1,490,110		
Aleatorio ubicación más cercana	3,383,468	1,524,622	1,344,582	1,745,503		
Ahorros	24.38%	12.01%	12.37%	14.63%		

Distancias por layout						
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4		
Dedicado Distribuido	2,558,511	1,341,545	1,178,225	1,490,110		
Dedicado Concentrado	3,344,520	1,453,938	1,306,197	1,659,252		
Ahorros	23.50%	7.73%	9.80%	10.19%		



Conclusiones

El propósito fundamental de esta tesis, consistió en proponer una estrategia de almacenamiento que permitiera ubicar los SKU's de tal forma que minimizara la distancia total de recorrido por almacenaje y recolección de cada SKU desde y hacia su ubicación.

A partir del análisis de la metodología y de los resultados de la simulación del almacén bajo estudio, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se identificó una oportunidad para mejorar las técnicas de asignación de ubicaciones a SKU's en almacenes a parir del luso de la tecnología RFID.
 - o Las técnicas de almacenamiento dedicado encontradas usualmente en la literatura asignan ubicaciones predefinidas a cada SKU. Cuando un SKU requiere varias celdas, estas son asignadas en forma adyacente, (almacenamiento dedicado concentrado) usualmente para facilitar que los recolectores recuerden las ubicaciones, decidan la ruta de recolección y puedan llevar un control visual del inventario.
 - La restricción de que las celdas del mismo SKU estén concentradas no se requiere cuando se tienen implantados sistemas basados en RFID que permitan:
 - Asignar en forma automática y registrar las ubicaciones precisas de cada SKU.
 - Registrar en forma precisa y en tiempo real los movimientos de los SKU's en el almacén y las existencias de inventario en cada ubicación.
 - Trazar las rutas de recolección en forma automática
 - Dar las indicaciones de recolección al trabajador, en tiempo real, por comunicación inalámbrica.



- Se propuso una estrategia de almacenamiento dedicado distribuida para mejorar la distancia total recorrida durante los procesos de almacenamiento y recolección del producto en un almacén de cargas unitarias.
 - Se propuso una configuración de un sistema basado en RFID para lograr un mayor control y facilidad en la administración de un almacén.
 - o Se demostró que cuando se usa una estrategia de administración de inventarios por revisión periódica y un SKU tiene varias ubicaciones asignadas, el número de visitas a cada uno de las ubicaciones puede ser significativamente diferente.
 - Se desarrolló una fórmula para estimar el número de viajes a cada ubicación de un mismo SKU.
 - Se desarrolló un método para asignar ubicaciones dedicadas para cada SKU pero que, cuando el SKU requiera varias ubicaciones por su nivel de inventario máximo, estas ubicaciones no tengan qué estar adyacentes.
- > Los resultados de la simulación permiten concluir que:
 - En los cuatro diferentes tipos de layout se tiene un 90% de confianza de que la estrategia de almacenamiento dedicado distribuido es mejor que la Dedicado concentrado y que la aleatoria.
- Esta estrategia permitió asignar ubicaciones a cada SKU dependiendo número esperado de viajes y asignándolos a las celdas más convenientes con el fin de minimizar las distancias y tiempos de traslado en las operaciones de recolección y almacenamiento de productos.
- Se evaluó una administración de inventarios por revisión periódica, que en conjunto con esta metodología, permitía simular el comportamiento del almacén bajo estudio, y calcular las distancias requeridas para almacenar y recolectar productos.



- ➢ Se compararon las diferentes estrategias de almacenamiento, permitiendo evaluar los resultados obtenidos, con los cuales concluimos con un 90% de confianza que la estrategia de almacenamiento dedicado distribuido si ayuda a minimizar la distancia total *Di*, para almacenar y recolectar un producto. Esto de acuerdo en que en las cuatro diferentes configuraciones de almacén (layout) que se analizaron, en cada una de ellas se obtuvo un beneficio de un 2% a un 5%.
- ➤ Mediante la simulación también se pudieron observar algunas de las principales desventajas de cada una de las estrategias analizadas. En el almacenamiento dedicado el cual tiene la limitante de mantener a sus SKU's en ubicaciones adyacentes (concentradas), lo cual reflejaba que aún y cuando se asignaban las ubicaciones por volumen de venta, se podía observar como algunas celdas de ese SKU no se visitaban, lo cual hacia que muchos SKU's tuvieran asignadas celdas con una distancia relativamente corta, no se visitaban, por lo que estaba ocupando un lugar que pudo haber sido mejor para otro SKU.
- > Se comprobó que el almacenamiento de la ubicación más cercana no siempre es mejor que la de almacenamiento dedicado por número de visitas, ya que depende de la demanda que los diferentes SKU's, y la distribución de la misma.
- También se observo que no existe una diferencia significativa en cuanto al cálculo realizado del número de viajes esperados, y el conteo de número de viajes obtenido durante la simulación de 1000 días. Esto le permite a la empresa asignar las ubicaciones de manera eficiente a cada producto sin la necesidad de contar con algún registro previo del número de viajes.



Investigaciones Futuras

A partir de esta tesis surgen algunas investigaciones que podrían realizarse como continuación del presente trabajo, que permitirían complementar la metodología propuesta:

- ➤ El análisis se enfocó sobre el estudio de un almacén de cargas unitarias, sin embargo una gran ventaja de esta estrategia viene cuando el almacenaje y recolección es múltiple (es decir, varios productos por viaje).
- ➤ Realizar un análisis con ubicaciones con diferentes capacidades, así como SKU's con diferentes volúmenes.
- Realizar un incremento en cuanto el número de SKU's analizados y una evaluación con los distintos layouts de almacén propuestos con las puertas de entrada/salida ubicadas en diferentes puntos del almacén
- Revisar los diferentes tipos de etiquetas, lectores y demás equipamiento que permita implementar un sistema RFID
- > Evaluar la factibilidad de implementar el sistema RFID propuesto, con el fin de analizar costos y beneficios del modelo.
- Proponer el algoritmo para calcular la ruta de que debería seguir el montacarguista para recolectar y almacenar productos.



Referencias Bibliográficas

- [1] Alcerreca H. (2007). RFID innovation warehouse. Electronics News 2007:3. Proquest.
- [2] Ballou R. (2004). *Administración de la Cadena de Suministro*. 5ª Ed. México Ed. Pearson Education.
- [3] Bartholdi, J and Hackman S. (2011). Warehouse and Distribution Science. (9ª. Ed.). The Supply Chain and Logistics Institute School of Industrial and Systems Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta, GA 30332-0205 USA.
- [4] Bragg, S. (2004). *Inventory best practices.* New York: Ed. Cromwell.
- [5] Chan, F. T. S., & Chan, H. K. (2011). Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. Expert Systems with Applications, 38, 2686–2700.
- [6] Chao, J; Po, S.; Ming, W. (2009). Storage assignment problem with travel distance and blocking considerations for a picker-to-part order picking system. Computers & Industrial Engineering, Mar2012, Vol. 62 Issue 2, p527-535, 9p; DOI: 10.1016/j.cie.2011.11.001.
- [7] Chopra, S. & Meindl, P. Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operations. Prentice Hall, 2003.
- [8] Davis, H.E. and Luehlfing, M.S. (2004), "Radio frequency identification: the wave of the future", Journal of Accountancy, Vol. 198 No. 5, pp. 43-9.



- [9] Frazelle, E. World-Class Warehousing and Material Handling. McGraw Hill, New York, New York, 2002.
- [10] Gue K. R. & Meller R.D. (2009). Aisle configurations for unit-load warehouses. IIE Transactions, 41(3):171–182, 2009.
- [11] Gu, J., Goetschalckx, М. and McGinnis, Jr., L.F., (2007)review," "Research on warehouse operation: Α comprehensive European Journal of Operational Research, 177(1), 1-21.
- [12] Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. (2010). Research on Warehouse Design and Performance Evaluation: A Comprehensive Review. European Journal of Operational Research, 203(3):539-549.
- [13] Godínez, L. (2008). *RFID: oportunidades y riesgos, su aplicación y práctica.* México: Ed. Alfaomega.
- [14] Heizer, J. & Render, B. 1997. Dirección de la producción. Ediciones Prentice Hill.
- [15] Hassan M.D. (2002). A framework for the design of warehouse lay out. European Journal. Vol. 20, 13/14 pp. 432 440. ISSN 0263-2772
- [16] Hellström D, Wiberg M. Improving inventory accuracy using RFID technology: a case study. Assem Autom 2010; 30(4):345-351.
- [17] Ho, G.T.S.; Choy, K.L.; Poon, T.C.; , "Providing decision support functionality in warehouse management using the RFID-based fuzzy association rule mining approach," Supply Chain Management and Information Systems (SCMIS), 2010 8th International Conference on , vol., no., pp.1-7, 6-9 Oct. 2010.



- [18] Hompel, M. T. (2007). Warehouse management: automation and organization of warehouse and picking systems. Berlin: Springer.
- [19] Huerta, I; Trigos, F & Díaz, J. (2006). Evaluación de la configuración de almacenes de gran capacidad.
- [20] Jones, P., Clarke-Hill, C., Shears, P., Comfort, D. and Hillier, D. (2004), "Radio frequency identification in the UK: opportunities and challenges", International Journal of Retail & Distribution Management, Vol. 32 No. 3, pp. 164-71.
- [21] Koster R., Le, & Roodbergen, J. (2008). Design and control of warehouse order picking: A literature review. European Journal of Operational Research, Volume 182, Issue 2, 16 October 2007, Pages 481–501.
- [22] Le-Duc, T. and De Koster, R., Layout optimization for class-based storage strategy warehouses, in Supply Chain Management European Perspective, 2005, 191-214.
- [23] Malmborg C. J., Optimization of cube per-order index warehouse layouts with zoning constraints International journal of production research ISSN 0020-7543 CODEN IJPRB8 1995, vol. 33, n2, pp. 465-482.
- [24] Miles, Stephen & Williams, John (2008). RFID technology and application. New York: Cambridge University.
- "RFID [25] B.S. (2005),the Osyk, B.A. and Vijayaraman, stand?". **WERC** members warehousing industry: where do WERCwatch, Warehousing Education Research Council, Oak Brook, IL, Winter.



- [26] Oztukoglu, O. (2011). New Warehouse Designs: Angled Aisles and Their Effects on Travel Distance. United States -- Alabama: Auburn University; 2011. Available from: Proquest.
- [27] Park, B. & Lee, Closest open location rule under stochastic demand.

 International Journal of Production Research. 2007. 45(7) 16951705
- [28] Petersen, C. (1999). The Impact of Routing and Storage Policies on Warehouse Eficiency. International Journal of Operations and Production Management, 19(10):1053-1064.
- [29] Pohl, L. & Meller, R (2009). Optimal Storage Strategies for Dual-Command Warehouses. IIE Annual Conference. Proceedings 2009:615-620.
- [30] Pohl L, Meller R, Gue K. Turnover-based storage in non-traditional unit-load warehouse designs. IIE Transactions [serial online]. October 2010; 43(10):703-720. Available from: Academic Search Premier
- [31] Ronald, J. M., Peter, C. S., & Sunderesh, S. H. (2007). Order oriented slotting: A new assignment strategy for warehouses. European Journal of Industrial Engineering, 1, 301–316
- [32] Roodbergen, K. and Vis, I. (2006). A Model for Warehouse Layout. IIE Transactions, 38:799-811.
- [33] Rowenhorst, B., Reuter, B., Stockrahm, V., van Houtum, G.J., Mantel, R.J., Zijm, W.H.M., 2000. Warehouse design and control: Framework and literature review. European Journal.
- [34] Silver, E., Pyke, D. & Peterson, R. (1998). Inventory Management and Production Planning and Scheduling. 3a Edition.



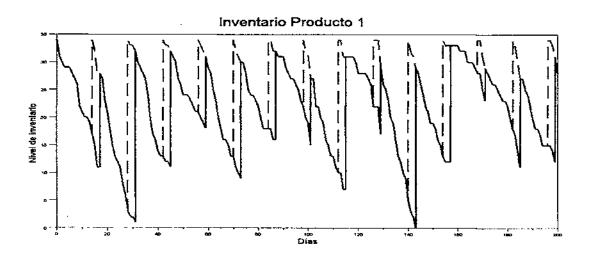
- [35] Sven, A. (2006). Inventory Control. 2nd Ed. New York: Springer
- [36] Tang, L. C., & Chew, E. P. (1997). Order picking systems: Batching and storage assignment strategies. Computers & Industrial Engineering, 33, 817–820.
- [37] Tersine, J. (2001). *Principles of Inventory and Materials Management.* 4a Ed. New York: North-Holland.
- [38] Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H. and Tanchoco, J.M.A., Facilities Planning, 2007 4a ed. (NJ: John Wiley & Sons).
- [39] Vijayaraman BS, Osyk BA. An empirical study of RFID implementation in the warehousing industry. International Journal of Logistics Management 2006; 17(1):6-20.
- [40] Zeng, A.; Mahan, M.; Fluet, N. (2002). Designing an efficient warehouse layout to facilitate the order-filling process: An industrial experience. Production and Inventory Management Journal; Third Quarter 2002; 43, 3/4; ProQuest pg. 83.

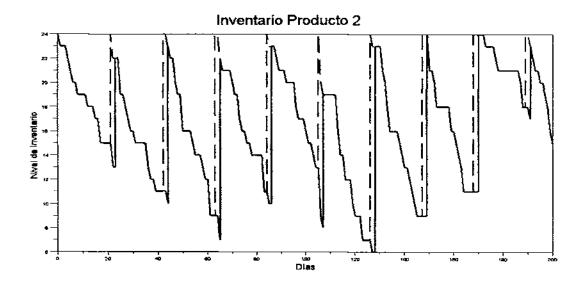


Anexos

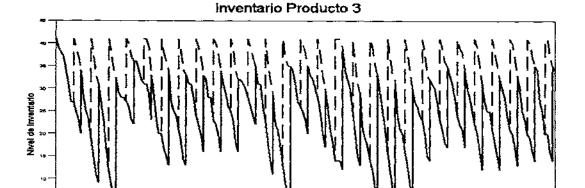
Comportamiento de los niveles de inventario durante un periodo de 200 días. La línea azul muestra el inventario físico existente en el almacén, mientras que la línea roja punteada representa el inventario en pedido, que está por llegar.

Comportamiento del inventario de cada producto

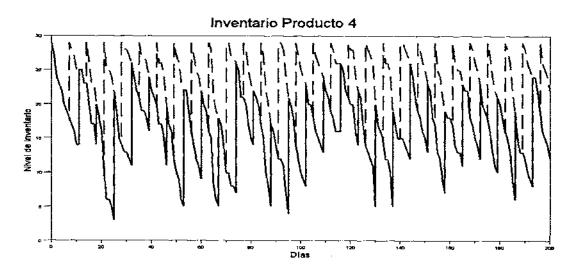


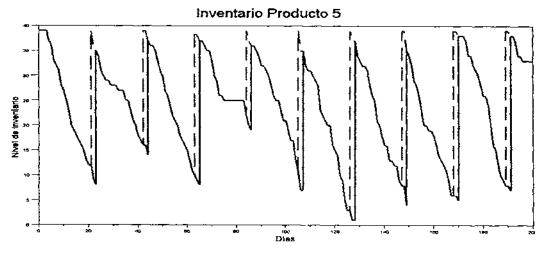




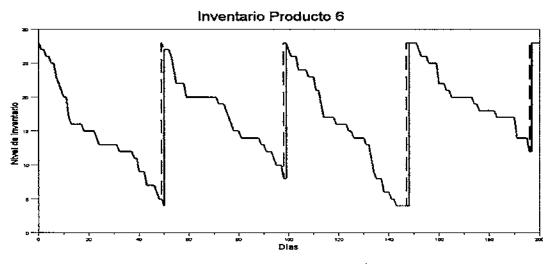


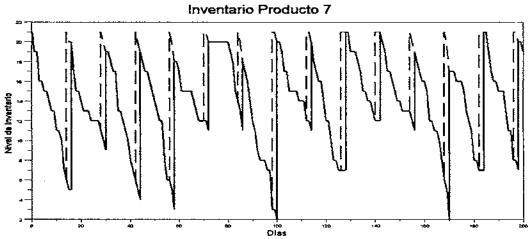
Dias

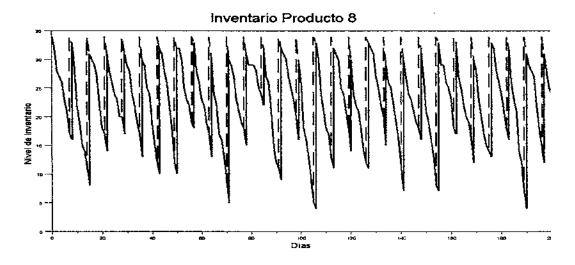




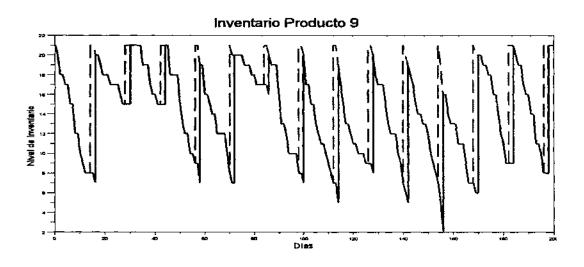


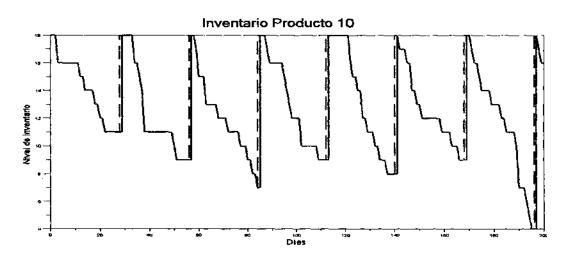


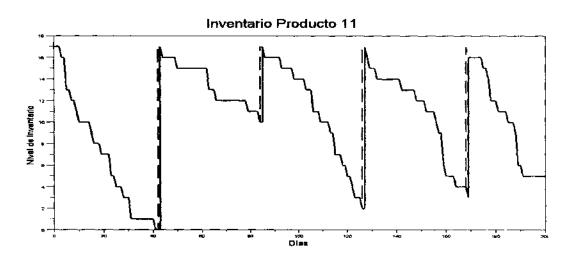




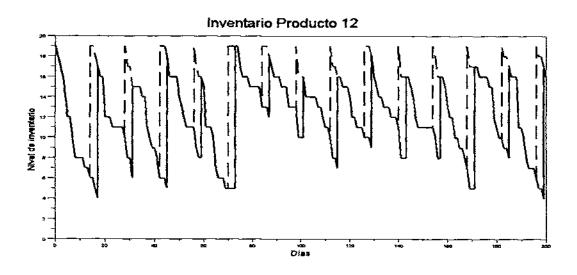


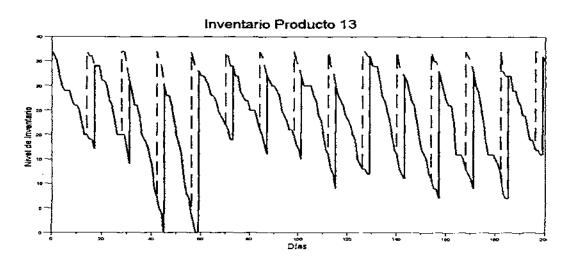


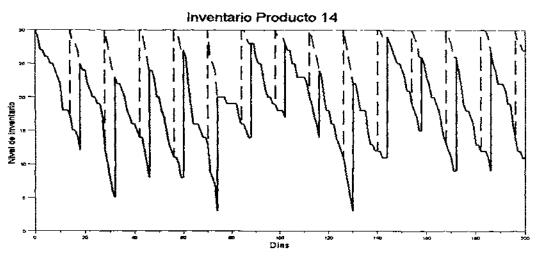




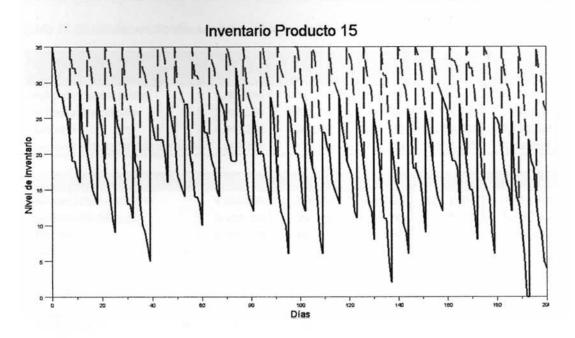












Distancias totales de las diferentes estrategias de almacenamiento con respecto a cada configuración

Escenario 1

Tabla 17 Información de los SKU

	1	2	3	4	5	6	7	8
Demanda semanal	10	5	20	12	9	3	6	20
T. Resurtido (días)	3	2	3	4	2	1	2	1

	9	10	11	12	13	14	15
Demanda semanal	6	3	2	5	11	8	15
T. Resurtido (días)	2	1	1	3	3	4	4



Tabla 18 Distancias recorridas Layout 1 Un solo pasillo

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	4,861,686	4,841,797	4,767,078	4,850,310	4,830,350				
Dedicado Distribuido	3,343,574	3,320,596	3,257,751	3,334,998	3,318,838				
Aleatorio	4,200,118	4,166,663	4,055,169	4,157,875	4,210,287				
Aleatorio ubicación más cercana	3,480,960	3,526,346	3,440,980	3,518,496	3,506,676				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	4,865,594	4,768,861	4,852,655	4,815,711	4,844,974
Dedicado Distribuido	3,340,369	3,269,006	3,325,596	3,301,174	3,295,267
Aleatorio	4,180,567	4,103,801	4,240,849	4,125,932	4,165,028
Aleatorio ubicación más cercana	3,555,593	3,508,723	3,498,131	3,495,749	3,491,725

Tabla 19 Distancias recorridas Layout 2 pasillos verticales

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	1,710,618	1,704,702	1,684,687	1,709,678	1,704,416				
Dedicado Distribuido	1,466,726	1,461,157	1,441,973	1,465,752	1,463,310				
Aleatorio	1,770,515	1,762,105	1,748,163	1,772,539	1,767,565				
Aleatorio ubicación más cercana	1,490,529	1,510,999	1,483,383	1,500,345	1,501,649				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,712,049	1,681,944	1,713,861	1,698,476	1,710,936
Dedicado Distribuido	1,464,697	1,441,731	1,470,289	1,455,611	1,459,994
Aleatorio	1,763,255	1,752,397	1,781,469	1,758,627	1,758,674
Aleatorio ubicación más cercana	1,511,468	1,486,297	1,503,510	1,497,954	1,506,085

Tabla 20 Distancias recorridas Layout 3 pasillos horizontales

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	1,511,445	1,507,470	1,487,848	1,510,772	1,506,061				
Dedicado Distribuido	1,289,606	1,284,441	1,268,150	1,288,643	1,286,567				
Aleatorio	1,751,024	1,750,895	1,715,892	1,749,084	1,758,800				
Aleatorio ubicación más cercana	1,323,161	1,340,950	1,315,703	1,330,395	1,328,648				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,513,229	1,484,958	1,516,062	1,502,424	1,507,992
Dedicado Distribuido	1,288,114	1,267,876	1,292,165	1,279,385	1,283,392
Aleatorio	1,740,247	1,722,876	1,765,782	1,741,120	1,754,210
Aleatorio ubicación más cercana	1,338,642	1,320,714	1,333,869	1,329,068	1,334,702



Tabla 21 Distancias recorridas Layout 4 pasillos angulados

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	1,670,652	1,663,429	1,644,727	1,683,640	1,655,971				
Dedicado Distribuido	1,501,744	1,494,528	1,472,705	1,514,983	1,487,798				
Aleatorio	1,757,234	1,789,820	1,756,889	1,784,296	1,779,581				
Aleatorio ubicación más cercana	1,538,280	1,527,232	1,510,183	1,550,012	1,525,340				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,658,318	1,654,436	1,649,874	1,642,072	1,669,400
Dedicado Distribuido	1,484,978	1,484,918	1,483,815	1,478,214	1,497,418
Aleatorio	1,755,393	1,744,643	1,781,124	1,765,889	1,777,960
Aleatorio ubicación más cercana	1,527,183	1,516,124	1,517,907	1,515,244	1,669,400

Tabla 22 Intervalos de confianza de cada una de las configuraciones

Layout 1, un solo pasillo								
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	п	LS	Ahorros			
Dedicado Concentrado	4,829,902	25,528	4,804,373	4,855,430	-			
Dedicado Distribuido	3,310,717	21,071	3,289,646	3,331,788	31.5%			
Aleatorio	4,160,629	38,800	4,121,829	4,199,429	13.9%			
Aleatorio ubicación más cercana	3,502,338	21,499	3,480,839	3,523,837	27.5%			

Layout 2, Pasillos verticales								
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	U	LS	Ahorros			
Dedicado Concentrado	1,703,137	8,154	1,694,982	1,711,291	-			
Dedicado Distribuido	1,459,124	7,109	1,452,015	1,466,233	14.3%			
Aleatorio	1,763,531	7,065	1,756,466	1,770,596	-3.5%			
Aleatorio ubicación más cercana	1,499,222	6,978	1,492,244	1,506,200	12.0%			

Layout 3, Pasillos Horizontales								
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	u	LS	Ahorros			
Dedicado Concentrado	1,504,826	7,477	1,497,349	1,512,304	-			
Dedicado Distribuido	1,282,834	6,138	1,276,696	1,288,972	14.8%			
Aleatorio	1,744,993	11,106	1,733,887	1,756,099	-16.0%			
Aleatorio ubicación más cercana	1,329,585	5,694	1,323,891	1,335,279	11.6%			

Layout 4, Pasillos angulados								
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	LI	LS	Ahorros			
Dedicado Concentrado	1,659,252	9,155	1,650,097	1,668,407	-			
Dedicado Distribuido	1,490,110	8,825	1,481,285	1,498,935	10.2%			
Aleatorio	1,769,283	10,873	1,758,410	1,780,156	-6.6%			
Aleatorio ubicación más cercana	1,539,691	33,679	1,506,011	1,573,370	7.2%			



Escenario 2

Se hicieron variaciones tanto en la demanda como en el tiempo de resurtido, haciendo que el 60% de la demanda se encontrase en el 20% de los SKU existentes en el almacén.

Tabla 23 Información de los SKU

	1	2	3	4	5	6	7	8
Demanda semanal	4	5	27	6	5	3	4	23
T. Resurtido (días)	3	2	3	4	2	1	2	1
	TRANSPORTED IN					2000		
	9	10	11	12	13	14	15	
	THE RESERVE OF THE PARTY OF THE	SERVICE STATE OF	THE RESERVE AND THE	UNIX SOURCE	SECURIOR SECURIO		Manager Street, Street	
Demanda semanal	4	3	4	5	6	5	30	

Tabla 24 Distancias recorridas Layout 1 un solo pasillo

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	4,342,634	4,303,084	4,265,189	4,324,172	4,324,351				
Dedicado Distribuido	3,098,052	3,058,178	3,031,556	3,065,398	3,073,649				
Aleatorio	4,141,633	4,016,487	3,957,926	4,021,316	4,013,249				
Aleatorio ubicación más cercana	3,588,578	3,586,706	3,550,576	3,579,320	3,578,174				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	4,345,095	4,277,258	4,334,940	4,317,715	4,353,402
Dedicado Distribuído	3,069,500	3,037,952	3,079,994	3,058,864	3,078,944
Aleatorio	4,053,287	3,968,327	4,091,061	4,002,501	4,033,186
Aleatorio ubicación más cercana	3,649,564	3,582,065	3,609,856	3,585,595	3,656,572



Tabla 25 Distancias recorridas Layout pasillos verticales

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	1,625,634	1,611,570	1,603,684	1,618,151	1,619,666				
Dedicado Distribuido	1,415,963	1,403,335	1,394,935	1,405,807	1,411,662				
Aleatorio	1,749,356	1,722,661	1,703,346	1,722,880	1,717,819				
Aleatorio ubicación más cercana	1,515,973	1,513,898	1,504,714	1,513,307	1,518,186				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,625,800	1,606,272	1,624,024	1,618,385	1,631,564
Dedicado Distribuido	1,409,034	1,396,592	1,413,989	1,405,272	1,416,132
Aleatorio	1,727,961	1,712,493	1,745,603	1,721,948	1,740,381
Aleatorio ubicación más cercana	1,533,699	1,510,164	1,521,422	1,517,594	1,537,077

Tabla 26 Distancias recorridas Layout pasillos horizontales

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	1,463,031	1,450,405	1,442,625	1,454,265	1,459,713				
Dedicado Distribuido	1,244,222	1,233,065	1,225,700	1,235,261	1,240,301				
Aleatorio	1,706,425	1,681,339	1,665,070	1,688,564	1,689,875				
Aleatorio ubicación más cercana	1,346,561	1,348,624	1,337,338	1,345,307	1,350,305				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,462,585	1,445,896	1,463,068	1,455,198	1,455,198
Dedicado Distribuido	1,238,054	1,226,856	1,241,983	1,235,680	1,235,680
Aleatorio	1,690,085	1,675,458	1,704,098	1,687,614	1,687,614
Aleatorio ubicación más cercana	1,364,476	1,344,750	1,348,194	1,348,194	1,348,194

Tabla 27 Distancias recorridas Layout pasillos angulados

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	1,664,759	1,658,685	1,639,406	1,677,388	1,650,152				
Dedicado Distribuido	1,495,127	1,489,393	1,466,798	1,507,965	1,481,073				
Aleatorio	1,791,542	1,814,667	1,763,763	1,828,699	1,794,536				
Aleatorio ubicación más cercana	1,564,085	1,546,291	1,528,304	1,573,096	1,546,036				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,651,663	1,650,017	1,645,347	1,637,880	1,664,851
Dedicado Distribuido	1,478,045	1,479,909	1,478,671	1,473,315	1,491,923
Aleatorio	1,787,701	1,746,414	1,818,515	1,760,994	1,775,206
Aleatorio ubicación más cercana	1,550,177	1,542,150	1,543,349	1,540,863	1,706,472



Tabla 28 Intervalos de confianza de cada una de las configuraciones

Layout 1, un solo pasillo								
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	U	LS	Ahorros			
Dedicado Concentrado	4,318,784	20,822	4,297,962	4,339,606	-			
Dedicado Distribuido	3,065,209	14,189	3,051,020	3,079,398	29.0%			
Aleatorio	4,029,897	39,208	3,990,690	4,069,105	6.7%			
Aleatorio ubicación más cercana	3,596,701	23,640	3,573,061	3,620,340	16.7%			

Layout 2, Pasillos verticales									
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	U	LS	Ahorros				
Dedicado Concentrado	1,618,475	6,416	1,612,059	1,624,891	-				
Dedicado Distribuido	1,407,272	5,382	1,401,890	1,412,654	13.0%				
Aleatorio	1,726,445	10,498	1,715,946	1,736,943	-6.7%				
Aleatorio ubicación más cercana	1,518,603	7,152	1,511,451	1,525,755	6.2%				

Layout 3, Pasillos Horizontales									
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	u	LS	Ahorros				
Dedicado Concentrado	1,455,198	5,151	1,450,047	1,460,350	-				
Dedicado Distribuido	1,235,680	4,293	1,231,387	1,239,974	15.1%				
Aleatorio	1,687,614	8,706	1,678,908	1,696,321	-16.0%				
Aleatorio ubicación más cercana	1,348,194	4,831	1,343,363	1,353,026	7.4%				

Layout 4, Pasillos angulados										
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	U	LS	Ahorros					
Dedicado Concentrado	1,654,015	8,878	1,645,137	1,662,893	-					
Dedicado Distribuido	1,484,222	8,560	1,475,662	1,492,782	10.3%					
Aleatorio	1,788,204	19,318	1,768,886	1,807,522	-8.1%					
Aleatorio ubicación más cercana	1,564,082	36,881	1,527,202	1,600,963	5.4%					

Tabla 29 Ahorros Almacenamiento dedicado distribuido vs ubicación más cercana

Distancias por layout									
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4					
Dedicado Distribuido	3,065,209	1,407,272	1,235,680	1,484,222					
Aleatorio ubicación más cercana	3,596,701	1,518,603	1,348,194	1,564,082					
Ahorros	14.78%	7.33%	8.35%	5.11%					

Distancias por layout										
Tipo de almacenamiento Layout 1 Layout 2 Layout 3 Layout										
Dedicado Distribuido	3,065,209	1,407,272	1,235,680	1,484,222						
Dedicado Concentrado	4,318,784	1,618,475	1,455,198	1,654,015						
Ahorros	29.03%	13.05%	15.09%	10.27%						



Escenario 3

Se hicieron variaciones tanto en la demanda como en el tiempo de resurtido, haciendo que el 80% de la demanda se encontrase en el 20% de los SKU existentes en el almacén.

Tabla 30 Información de los SKU

	1	2	3	4	5	6	7	8
Demanda semanal	1	2	39	1	2	1	2	38
T. Resurtido (días)	1	3	2	4	2	2	2	2

	9	10	11	12	13	14	15
Demanda semanal	2	1	2	2	1	1	42
T. Resurtido (días)	2	2	2	3	3	4	2

Tabla 31 Distancias recorridas Layout 1 un solo pasillo

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	3,361,106	3,335,944	3,329,144	3,360,142	3,351,444				
Dedicado Distribuido	2,570,985	2,541,062	2,550,861	2,556,339	2,568,468				
Aleatorio	3,459,391	3,384,474	3,405,696	3,522,013	3,543,438				
Aleatorio ubicación más cercana	3,403,360	3,316,866	3,427,392	3,360,599	3,376,977				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	3,347,586	3,301,587	3,373,808	3,343,907	3,340,530
Dedicado Distribuido	2,545,198	2,528,235	2,580,658	2,575,181	2,568,121
Aleatorio	3,453,758	3,412,846	3,490,831	3,409,243	3,451,520
Aleatorio ubicación más cercana	3,312,298	3,374,392	3,419,819	3,347,073	3,495,903



Tabla 32 Distancias recorridas Layout pasillos verticales

Distancias totales recorridas									
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5				
Dedicado Concentrado	1,460,295	1,449,987	1,447,559	1,453,160	1,460,272				
Dedicado Distribuído	1,345,464	1,334,545	1,336,739	1,338,239	1,346,892				
Aleatorio	1,644,621	1,646,367	1,637,103	1,633,524	1,651,358				
Aleatorio ubicación más cercana	1,527,168	1,512,840	1,525,246	1,519,228	1,523,646				

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,450,714	1,439,753	1,465,157	1,459,147	1,453,339
Dedicado Distribuido	1,337,653	1,328,453	1,352,037	1,348,594	1,346,831
Aleatorio	1,645,249	1,622,612	1,664,694	1,654,410	1,650,533
Aleatorio ubicación más cercana	1,507,148	1,511,809	1,543,366	1,524,227	1,551,543

Tabla 33 Distancias recorridas Layout pasillos horizontales

Distancias totales recorridas										
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5					
Dedicado Concentrado	1,310,130	1,299,769	1,302,513	1,307,342	1,306,489					
Dedicado Distribuido	1,181,826	1,171,740	1,173,867	1,175,372	1,183,051					
Aleatorio	1,670,348	1,644,534	1,668,079	1,662,201	1,680,446					
Aleatorio ubicación más cercana	1,346,546	1,332,982	1,346,050	1,341,248	1,345,522					

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,308,173	1,292,345	1,314,654	1,310,214	1,310,337
Dedicado Distribuido	1,174,727	1,166,515	1,187,622	1,184,707	1,182,820
Aleatorio	1,658,248	1,644,940	1,684,508	1,666,797	1,652,623
Aleatorio ubicación más cercana	1,330,315	1,335,394	1,359,384	1,341,370	1,367,009

Tabla 34 Distancias recorridas Layout pasillos angulados

Distancias totales recorridas								
Tipo de almacenamiento	1	2	3	4	5			
Dedicado Concentrado	1,670,652	1,663,429	1,644,727	1,683,640	1,655,971			
Dedicado Distribuido	1,501,744	1,494,528	1,472,705	1,514,983	1,487,798			
Aleatorio	1,757,234	1,789,820	1,756,889	1,784,296	1,779,581			
Aleatorio ubicación más cercana	1,743,904	1,731,379	1,712,051	1,757,204	1,729,234			

Tipo de almacenamiento	6	7	8	9	10
Dedicado Concentrado	1,658,318	1,654,436	1,649,874	1,642,072	1,669,400
Dedicado Distribuido	1,484,978	1,484,918	1,483,815	1,478,214	1,497,418
Aleatorio	1,755,393	1,744,643	1,781,124	1,765,889	1,777,960
Aleatorio ubicación más cercana	1,731,323	1,718,787	1,720,807	1,717,788	1,892,551



Tabla 35 Intervalos de confianza de cada una de las configuraciones

Layout 1, un solo pasillo							
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	u	LS	Ahorros		
Dedicado Concentrado	3,344,520	14,315	3,330,205	3,358,834	-		
Dedicado Distribuido	2,558,511	12,105	2,546,406	2,570,616	23.5%		
Aleatorio	3,453,321	37,609	3,415,712	3,490,930	-3.3%		
Aleatorio ubicación más cercana	3,383,468	39,730	3,343,738	3,423,198	-1.2%		

Layout 2, Pasillos verticales							
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	LI LI	LS	Ahorros		
Dedicado Concentrado	1,453,938	5,345	1,448,594	1,459,283			
Dedicado Distribuido	1,341,545	5,339	1,336,206	1,346,883	7.7%		
Aleatorio	1,645,047	8,413	1,636,634	1,653,460	-13.1%		
Aleatorio ubicación más cercana	1,524,622	9,893	1,514,729	1,534,516	-4.9%		

Layout 3, Pasillos Horizontales							
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	u	LS	Ahorros		
Dedicado Concentrado	1,306,197	4,601	1,301,596	1,310,798	-		
Dedicado Distribuido	1,178,225	4,806	1,173,419	1,183,031	9.8%		
Aleatorio	1,663,272	9,711	1,653,562	1,672,983	-27.3%		
Aleatorio ubicación más cercana	1,344,582	8,166	1,336,416	1,352,748	-2.9%		

Layout 4, Pasillos angulados							
Tipo de almacenamiento	Media	MIC	U	LS	Ahorros		
Dedicado Concentrado	1,659,252	9,155	1,650,097	1,668,407			
Dedicado Distribuido	1,490,110	8,825	1,481,285	1,498,935	10.2%		
Aleatorio	1,769,283	10,873	1,758,410	1,780,156	-6.6%		
Aleatorio ubicación más cercana	1,745,503	38,181	1,707,322	1,783,684	-5.2%		

Tabla 36 Ahorros Almacenamiento dedicado distribuido vs ubicación más cercana

Distancias por layout								
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4				
Dedicado Distribuido	2,558,511	1,341,545	1,178,225	1,490,110				
Aleatorio ubicación más cercana	3,383,468	1,524,622	1,344,582	1,745,503				
Ahorros	24.38%	12.01%	12.37%	14.63%				

Distancias por layout								
Tipo de almacenamiento	Layout 1	Layout 2	Layout 3	Layout 4				
Dedicado Distribuido	2,558,511	1,341,545	1,178,225	1,490,110				
Dedicado Concentrado	3,344,520	1,453,938	1,306,197	1,659,252				
Ahorros	23.50%	7.73%	9.80%	10.19%				

