

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERIA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TEC de Monterrey
DEL SISTEMA TECNOLÓGICO DE MONTERREY

ASIGNACION DE PRODUCTOS PERECEDEROS AL AREA
DE DESPACHO CON CAPACIDAD LIMITADA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

POR:

TANIA PRISCILA VILLARREAL FLORES

MONTERREY, N. L.

MAYO 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TEC de Monterrey®

DEL SISTEMA TECNOLÓGICO DE MONTERREY

ASIGNACION DE PRODUCTOS PERECEDEROS AL AREA
DE DESPACHO CON CAPACIDAD LIMITADA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

POR:

TANIA PRISCILA VILLARREAL FLORES

MONTERREY, N. L.

MAYO 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



TEC de Monterrey®

DEL SISTEMA TECNOLÓGICO DE MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

ASIGNACION DE PRODUCTOS PERECEDEROS AL AREA DE DESPACHO
CON CAPACIDAD LIMITADA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS
DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

POR:

TANIA PRISCILA VILLARREAL FLORES

MONTERREY, N. L.

MAYO 2011

ASIGNACION DE PRODUCTOS PERECEDEROS AL AREA DE DESPACHO
CON CAPACIDAD LIMITADA

POR:

TANIA PRISCILA VILLARREAL FLORES

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
SISTEMAS DE CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY

MAYO 2011

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por su apoyo en la culminación de mis estudios profesionales y de posgrado, por su motivación a lo largo de este camino así como por su ejemplo y formación de la persona que soy hoy en día.

A Luis, por su apoyo y ayuda en los días más difíciles, así como por la motivación brindada para acabar este proyecto.

Al Dr. Neale Smith, por su dirección a lo largo de la elaboración de mi tesis y por todo el apoyo brindado a lo largo de mi maestría.

Al Dr. Leopoldo Cárdenas y al Dr. Francisco Ángel Bello, por su disposición en su participación como sinodales y por el apoyo y aportaciones brindadas.

INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCION.....	6
1.1 Antecedentes.....	6
1.2 Justificación.....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.4 Alcance.....	9
CAPITULO 2. Marco Teórico.....	10
2. 1 Administración de almacenes.....	10
2.2 Recolección de órdenes.....	13
2.3 Problema del área de reserva-delantera.....	17
2. 4 Trabajos previos.....	19
CAPITULO 3. DEFINICION DEL PROBLEMA.....	23
3.1 Entorno del problema.....	23
3.2 Situación que se requiere mejorar.....	25
CAPITULO 4. MODELOS.....	27
4.1 Modelo propuesto por Bartholdi y Hackman.....	27
4.2 Adaptación del modelo propuesto por Bartholdi y Hackman.....	30
4.3 Modelo en ampl.....	34
CAPITULO 5. METODOS DE SOLUCION.....	37
5. 1 Algoritmo de eficiencia de trabajo propuesto por Bartholdi y Hackman.....	37
5.2 Adaptación del algoritmo de eficiencia de trabajo.....	39
5.3 Algoritmo miope.....	42
5. 4 Solver Cplex.....	43

CAPITULO 6. EXPERIMENTACION COMPUTACIONAL.....	44
6.1 Proceso de generación de instancias.....	44
6.2 Definición de instancias.....	46
6. 3 Comparación de los métodos propuestos.....	48
6. 4 Análisis de los parámetros.....	49
6.4.1 Tamaño de la demanda.....	50
6.4.2 Costos propuestos.....	51
6.4.3 Capacidad del área delantera.....	51
6.4.4 Recolecciones.....	52
CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES.....	54
7.1 Conclusiones.....	54
7.2 Futuras investigaciones.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	59
ANEXOS.....	61
Anexo 1. Artículo.....	62

CAPITULO 1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

Hoy en día, los negocios avanzan cada vez más rápido en innovaciones en sus procesos de producción y administración, esto debido a clientes más exigentes y más demandantes de productos de excelente calidad y al menor precio.

El éxito o fracaso de un negocio, viene relacionado de un gran número de decisiones y estrategias a lo largo de la cadena de suministro, en la aplicación de la administración actual, el almacén es un medio para lograr economías en aumento y para incrementar las utilidades de la empresa, si se toman las decisiones correctas.

El objetivo de cualquier empresa es obtener mayores utilidades con la menor inversión, una de las maneras de retener clientes y atraer a clientes potenciales, es mediante la disponibilidad de los productos ofrecidos siempre que se necesiten. Es por eso que una política de inventarios, que te permita satisfacer la demanda del cliente al menor costo posible, es una de las decisiones más importantes en cualquier empresa.

La administración de los almacenes, está compuesta de un gran número de procesos y decisiones, entre las principales se encuentran:

- Numero de almacenes y tamaño
- Localización de almacenes

- Política de inventarios
- Que productos y en qué cantidad se deben de almacenar

Durante el desarrollo de este trabajo, se hará en enfoque en el último punto, a fin de desarrollar un modelo que permita tomar las mejores decisiones al menor costo posible, ante una exigencia cada vez mayor en los negocios.

1.2 Justificación

La recolección de órdenes es el proceso más importante en la mayoría de los almacenes, ya que consume la mayor cantidad de mano de obra así como determina el nivel de servicio experimentado por los clientes. La importación de la recolección de productos se ha incrementado en los últimos años, con la presión de reducir inventarios mientras las líneas de producción se amplían. Este proceso representa alrededor del 65% del costo total operativo en un almacén, la actividad que mayor tiempo requiere en este proceso es el viaje del recolector, el cual consume aproximadamente el 50% del tiempo total de proceso.

El tener una correcta asignación de productos en el almacén, en ubicación y cantidad, puede reducir significativamente el tiempo requerido para recolectar una orden ya que reduce los viajes entre el área de reserva y el área delantera, y por ende, el costo total de la tarea se reduce.

En trabajos previos, se han desarrollado modelos para determinar la asignación de los productos en el almacén, sin embargo pueden resultar poco adaptables a situaciones de la

realidad, por la continuidad del planteamiento o por las situaciones específicas sobre las cuales fueron desarrollados. En muchas ocasiones pueden ser difíciles de utilizar por los requerimientos computacionales así como la inversión y el tiempo requerido.

Es por eso que surge la necesidad de contar con una metodología que de flexibilidad de adaptación e implementación, siendo posible de utilizar en situaciones que comúnmente se ven en la actualidad.

1.3 Objetivos

Los objetivos propuestos en el desarrollo de este trabajo son los siguientes:

1. Adaptar el modelo desarrollado por Bartholdi y Hackman a un problema con asignaciones de espacios enteros y capacidad limitada.
2. Adaptar el algoritmo de eficiencia de trabajo propuesto por Bartholdi y Hackman, con asignaciones de espacios enteros y capacidad limitada.
3. Desarrollar un algoritmo alternativo que resuelva el problema de asignación adaptada a situaciones actuales.
4. Realizar una comparación sobre los resultados obtenidos en los dos métodos propuestos y el solver CPLEX, sobre instancias de experimentación.

1.4 Alcance

En el desarrollo de este trabajo se tomo de base una situación actual en un almacén de una empresa especializada en alimentos, donde se cuenta con una gran variedad de productos y dos áreas de almacenamiento, el área delantera y el área de reserva. Los productos se encuentran almacenados en cajas. Son solicitados por los clientes en unidades individuales, debido al tipo de producto que se me almacena, perecederos, los productos pueden permanecer solo por un corto plazo en el almacén.

Sobre la situación actual se partió para desarrollar 288 instancias usadas para la experimentación y resolución del problema de asignación, implementando los modelos propuestos.

CAPITULO 2. Marco Teórico

2. 1 Administración de almacenes

Los almacenes son un aspecto clave en la cadena de suministro y juegan un rol vital en el éxito o fracaso de los negocios (Frazelle, 2002). Aunque muchas compañías han examinado la posibilidad de suplir directamente sus productos al cliente, existen muchas circunstancias donde esto no es la mejor opción, un ejemplo es cuando los tiempos de entrega de los proveedores no se pueden reducir de manera económica, esto en conjunto con la exigencia de los cortos tiempos de entrega que requieren los clientes, por lo que los clientes necesitan entonces ser servidos de un inventario y no de una orden.

Así como los almacenes son críticos para una buena oferta de servicio a los clientes, también son significativos desde un punto de vista económico. Los costos de administración del almacén formaron el 20% de los costos totales de logística en las compañías en el 2003 de acuerdo a ELA/AT Kearney (2004).

En la actualidad, en un almacén se enfrentan con muchos retos, se tienen que ejecutar cada vez un mayor número de procesos más pequeños, manejar y almacenar más productos, ofrecer más flexibilidad y adaptabilidad de productos y servicios así como proveer un valor agregado, todo esto al menor tiempo posible y con el menor margen de error. Mientras muchas compañías tratan de resolver estos retos con más tecnología, una mejor solución puede resultar de un análisis detallado de las órdenes de los clientes y productos que se tienen en el almacén. Frazelle (2002) menciona que la mayoría de los almacenes gastan

entre el 10% y 30% más por año de lo que deberían, ya que se estima que menos del 15% de los productos que manejan se encuentran correctamente asignados a su lugar de almacenaje.

De acuerdo a Rouwenhorst (2000), el flujo de productos en un almacén puede ser dividido en diferentes fases o procesos:

- **Recepción:** es el primer proceso al momento de llegar el producto, los productos pueden llegar al almacén por medio de camiones o transporte interno, en esta etapa los productos pueden ser revisados para control de calidad o sufrir alguna transformación (como ser re empacados en diferentes módulos de almacenamiento), y posteriormente hay un tiempo de espera para ser transportados al siguiente proceso.
- **Almacenaje:** en este proceso los productos son colocados en ubicaciones dentro del almacén, el cual puede consistir de dos partes: el área de reserva, donde los productos son almacenados en la manera más económica posible, y el área delantera, donde son almacenados para poder facilitar la recolección de órdenes de los clientes. Los productos del área delantera son almacenados por lo general en cantidades pequeñas para facilitar el acceso a los módulos de almacenaje. La transferencia de productos del área de reserva a la delantera es llamada reabastecimiento.
- **Recolección de órdenes:** se refiere a la extracción de productos de su lugar de almacenaje, y puede ser desarrollado manualmente o parcialmente automatizado. Estos productos se agrupan posteriormente de acuerdo a la orden solicitada por el cliente.

- Embarque: en el área de embarque las órdenes son revisadas, empacadas y cargadas a camiones, trenes o cualquier otro medio de transporte.

Van den Berg (1999), presenta tres diferentes enfoques en la administración de almacenes que han sido estudiados, los cuales son:

- Reducción de niveles de inventario: se puede lograr una reducción de inventarios utilizando cantidades menores en las ordenes solicitadas al proveedor y de manera más frecuente, aun así, la capacidad de almacenamiento total sigue siendo aspecto de consideración en el caso que todas las entregas ocurran al mismo tiempo, por lo que el espacio de almacenamiento se podría reducir si se programan aisladamente las entregas.
- Asignación de productos a almacenar: un enfoque común para reducir la cantidad de trabajo asociado con la recolección de órdenes, es dividir el almacén en las dos áreas mencionadas anteriormente, un área delantera y una de reserva.
- Ubicación de productos a asignar: este problema consiste en donde asignar los productos que llegan a las diferentes ubicaciones en el almacén. Para sistemas automáticos, existen tres diferentes policías de almacenaje: basado en clases, aleatorio y almacenaje dedicado.

2.2 Recolección de órdenes

La recolección de órdenes se refiere al proceso de obtener los productos de su ubicación en el almacén para satisfacer las órdenes de los clientes. Constituye el 65% del costo total de un almacén (Coyle, 2003). Aunque la recolección parece una tarea relativamente simple de desarrollar, se realiza de muchas maneras distintas en las compañías.

Existen dos decisiones significativas para tomar en cuenta que determinan la eficiencia de las operaciones de recolección de órdenes:

- **Almacenamiento:** almacenar productos a ubicaciones en el almacén, los productos pueden ser asignados aleatoriamente, productos similares pueden ser agrupados en una misma área del almacén, o los productos pueden ser asignados en base a las órdenes de los clientes o al volumen. Las decisiones basadas en volumen, coloca los productos de mayor volumen cerca de los puntos de salida del almacén para minimizar el tiempo de viaje.
- **Ruteo:** consiste en determinar la ruta del recolector para completar una orden, especificando el orden en que los productos van a ser tomados. Estas decisiones pueden incluir heurísticos simples o procedimientos óptimos. (Coyle, 1996).

En la Figura 1 se muestra los componentes de una tarea de recolección de órdenes así como el porcentaje de tiempo que consume.

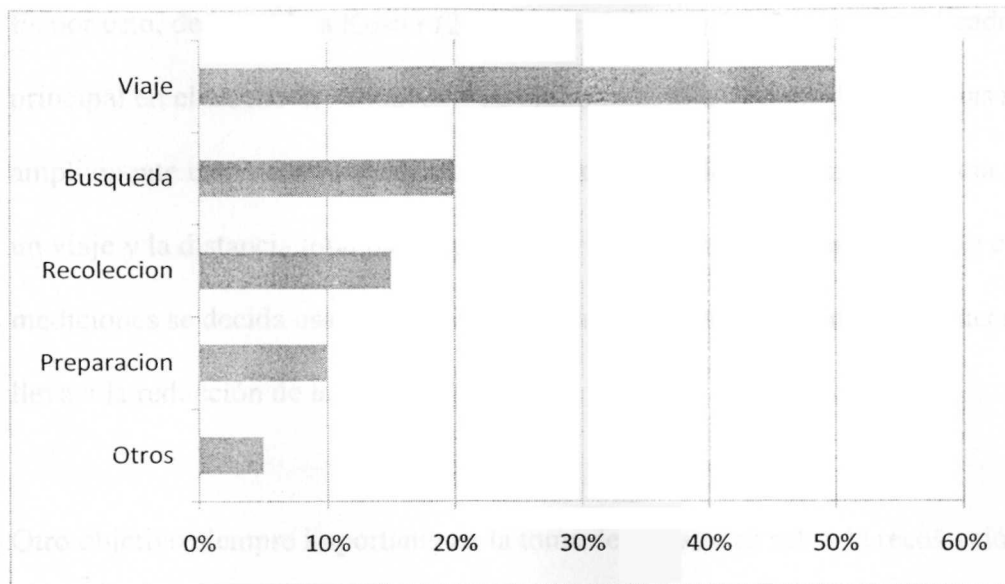


Figura 1. Distribución típica del tiempo de recolección de órdenes. (Koster, 2007)

Aunque muchos estudios han demostrado que otras actividades, además del viaje de recorrido, forman parte del tiempo para desarrollar la actividad, el viaje es el componente más dominante. De acuerdo a Bartholdi y Hackman (2005), el tiempo de viaje es un desperdicio, cuesta horas de trabajo pero no añade valor, por lo que es la primera área de oportunidad para desarrollar mejoras.

En general, el tiempo de viaje consume cerca del 50% del tiempo total de la recolección como se observa en la Figura 1, por lo que reducir las distancias de viaje nos lleva a una reducción en el tiempo requerido de viaje, lo que a su vez nos lleva a disminuir el tiempo total requerido y por lo tanto los costos totales del almacén.

Es por esto, de acuerdo a Koster (2007), que el tiempo de viaje es considerado el objetivo principal en el diseño del almacén y su optimización. Dos tipos de distancias son ampliamente usadas en la literatura de la recolección de órdenes: la distancia promedio de un viaje y la distancia total para un conjunto dado de órdenes, cualquiera de estas dos mediciones se decida usar va a llevar al mismo objetivo, y por ende la reducción de una lleva a la reducción de la otra.

Otro objetivo siempre importante en la toma de decisiones sobre la recolección, es minimizar el costo total (que debe incluir los costos de inversión y los de operación). A continuación se mencionan otros objetivos que son comúnmente tomados en consideración:

- Minimizar el tiempo requerido por orden
- Minimizar el tiempo total requerido (para completar un lote de órdenes)
- Maximizar el uso del espacio
- Maximizar el uso del equipo
- Maximizar el uso de mano de obra
- Maximizar la accesibilidad a todos los productos del almacén

No todas las compañías utilizan las mismas decisiones y el mismo tipo de recolección de órdenes, ya que lo que es mejor para un tipo de producto puede no serlo para otro.

Ackerman (1990) define tres diferentes tipos de recolección:

- Estricta recolección: a cada recolector se le asigna solamente una orden, la cual tiene que extraer del almacén, independientemente de los productos y ubicación de los mismos.
- Recolección en lotes: El recolector toma un grupo de órdenes, la lista del lote está preparada de tal manera que contenga la cantidad total de cada producto para todas las órdenes, al recolectar todos los productos los lleva a un área donde los separa en órdenes individuales.
- Recolección por zonas: el recolector es asignado a solamente un área del almacén, al ser asignada una orden, recolecta todos los productos que están en su zona, y posteriormente se la pasa al siguiente recolector para que haga lo mismo, hasta que se cubran todas las zonas del almacén.

Bartholdi (2005) describe otro tipo de recolección en el almacén, Bucket brigades, en el cual los recolectores son asignados en orden del más lento al más rápido, el primer recolector toma la siguiente orden y comienza a tomar los productos, conforme el último trabajador va terminando las órdenes, continúa con la actividad del recolector que se encuentra antes de él en la línea y así sucesivamente, de tal manera que la carga de trabajo siempre está balanceada evitando tiempos de ocio y cuellos de botella.

Algunas de las decisiones que las compañías deben tomar a nivel táctico y operacional en torno al diseño y control de los sistemas de recolección de acuerdo a Rouwenhorst (2000) son los siguientes:

- Diseño del layout y dimensiones del almacén (nivel táctico)
- Asignar productos a ubicaciones del almacén (nivel operacional y táctico)
- Asignar órdenes para recolectar en grupos y agrupar pasillos en áreas de trabajo (nivel operacional y táctico)
- Asignación del viaje de la persona a recolectar la orden. (Nivel operacional)
- Agrupar las recolecciones de varias órdenes (nivel operacional)

2.3 Problema del área de reserva-delantera

Los almacenes convencionales necesitan suficiente espacio de almacenamiento para acomodar el inventario de todos los productos. Comúnmente también es ineficiente recolectar las ordenes directamente de su lugar de almacenamiento por dos razones principales: la primera es que el área de almacenamiento puede incluir equipo que utiliza gran densidad de espacio para maximizar el utilización, sin embargo estas tecnologías no permiten un fácil acceso y obtención de los productos, la segunda razón es porque recoger ordenes dentro de un área larga puede producir que se genere un tiempo excesivo de viaje entre productos que termina en una disminución de la productividad.

Por estas razones, muchos almacenes usan otro tipo de área, llamada área delantera, para una recolección de órdenes más eficiente. El área delantera está diseñada para tener un espacio físicamente compacto que utiliza equipo que facilita la obtención de productos, como con flujo de gravedad, que permite un rápido acceso y obtención, mientras que en el área de reserva es posible mantener los productos en tarimas.

El contar con un área delantera puede mejorar la eficiencia de la recolección, pero requiere un reabasto adicional de los productos, la actividad de transferir producto del área de reserva al área delantera es llamada reabastecimiento. Por otra parte, la capacidad de almacenamiento del área delantera debe de ser limitada para mantener una distancia de viaje adecuada, mientras más productos se asignen al área delantera, menos espacio puede ser asignado a cada uno y consecuentemente el número de reabastos aumenta y ocurre con más frecuencia. Es por esto que es importante determinar con mucho cuidado cuales productos van a ser asignados y en qué cantidades, para balancear el costo/beneficio entre una rápida recolección y los reabastos, permitiendo una alta eficiencia en el almacén. (Gu, 2010).

De acuerdo a Frazelle (2002), existen diferentes métodos para asignar SKUS dentro del almacén, entre ellos están:

- Popularidad: principio que se basa en el número de veces que un producto es solicitado en órdenes del cliente, esto convertido en el número de veces que la persona debe viajar al lugar donde se encuentra el producto solicitado, este método es el más común en la práctica.
- Rotación: la cantidad total que un SKU es embarcado en un cierto periodo de tiempo, algunas veces referido a la demanda del SKU.
- Volumen: La demanda del SKU multiplicado por su volumen cubico, comúnmente llamado movimiento cúbico de un SKU.

- Densidad de la recolección: la proporción entre la popularidad del producto y su volumen cúbico. De esta manera se identifica a los SKUS que tienen el mayor número de recolecciones por un espacio dado.
- COI: la proporción entre el volumen cúbico del SKU y su rotación,

2. 4 Trabajos previos

Muchas investigaciones se han hecho en torno al problema de recolección de órdenes, la más sobresaliente y que ha servido de base para otras investigación, es la de Hackman y Rosenblatt (1990) quienes fueron los primeros en investigar el problema del área de reserva-delantera, definiendo cuales productos asignar en el área delantera y en qué cantidad. Ellos consideraron un almacén compuesto por un área delantera pequeña con un sistema automático de colocación y obtención de productos, así mismo un área de reserva de capacidad infinita manejado por un sistema manual o semiautomático. El problema fue resuelto por medio de un heurístico miope donde los productos son asignados al área delantera de acuerdo a su deseabilidad de ser asignados.

El modelo matemático propuesto por ellos tiene un grupo de variables enteras que indican si un producto es asignado o no en el área delantera, y un conjunto de variables continuas que indican cuanto espacio en el área delantera se designa a cada producto de esta área. El objetivo consiste en maximizar el beneficio total del área delantera, el cual es, el ahorro entre realizar una recolección en el área delantera menos los costos de reabasto. Este

modelo es similar al problema de la mochila, con la diferencia de que tiene un objetivo que no es lineal y que es discontinuo en cero.

Partiendo de esta investigación, Frazelle (1994) incorporo al heurístico desarrollado previamente, la variable del tamaño del área delantera, junto con la asignación de los productos a la misma, donde los costos del modelo para recolectar productos y sus reabastos dependen del tamaño del área delantera. Esto es, al aumentar el tamaño del área delantera, mejora la eficiencia de obtención de órdenes y disminuye el costo de trabajo hasta cierto punto, ya que los costos de recolectar un producto son menores en el área delantera que en el área de reserva, sin embargo, disminuye la eficiencia total de almacenaje, ya que el espacio en el área de reserva disminuye, así mismo el costo de los reabastos aumenta entre mayor sea el tamaño del área delantera.

Nguyen (2005) presento un modelo matemático para una variante del problema del área de reserva-delantera, en el cual se considera que la demanda de los productos cambia con el tiempo, lo que puede resultar en una incorrecta asignación de los productos en el almacén. En esta investigación se tomo en cuenta el costo/beneficio entre los costos de recolección y el costo de reasignar los productos en diferentes áreas conforme el cambio de la demanda en el horizonte de planeación, llegando a la conclusión que se puede lograr un ahorro en el costo, reasignando productos en el área delantera constantemente cada periodo de tiempo que la demanda cambia. Entre más cambie la demanda, mayores ahorros se pueden alcanzar con el modelo propuesto.

Van den Berg y Sharp (1998) desarrollaron un modelo en un escenario donde se observan periodos de ocupación así como de ocio. Los autores proponen que los reabastos se desarrollen durante los periodos de ocio, de tal manera que cuando se soliciten ordenes no solo van a mejorar los resultados de recolección, sino también se observa menos congestión y accidentes en el almacén. El objetivo de su modelo es determinar cuáles son los reabastos que minimizan la cantidad de trabajo durante los periodos de ocupación.

Bozer (1985) estudio dos diferentes configuraciones, una donde se tiene un área delantera adyacente al área de reserva, y otra donde se encuentran separadas. Desarrollo un modelo cuantitativo que evalúa el costo/beneficio basado en la ubicación actual de los productos dentro del área delantera asumiendo que ya han sido determinados los productos que se colocaran en esta área.

Heragu (2003) desarrollo un modelo matemático en el que se determina la mejor ubicación de los productos, tomando en cuenta las áreas funcionales de un almacén, así como el tamaño de las mismas. Los procesos tomados en cuenta para este modelo son: recibimiento de material, transporte de material, área de reserva y área delantera. El objetivo del modelo consiste en minimizar el costo total de manejar el promedio de las cargas anuales de cada producto, asignado a su respectiva área, así como los costos anuales de almacenaje. El autor toma como base información medible que se encuentra en cualquier almacén, así como construye el modelo con restricciones realistas que son aplicables a almacenes actuales.

Otra de los estudios que se han hecho entorno a este tema, es sobre el ruteo de los recolectores, Hall (1993) evaluó y comparo diferentes estrategias sobre los viajes que un recolector tiene que hacer en un almacén manual, ampliando la investigación previa y derivando ecuaciones que relacionan la distancia del viaje así como los diferentes atributos del almacén.

Entre las investigación más recientes, se encuentra la de Henn (2010), enfocándose al problema donde dado un numero de ordenes de clientes, como deben de ser combinadas de tal manera que la duración total del viaje sea minimizada, tomando en cuenta dos enfoques meta heurísticos, obteniendo que los algoritmos propuestos pueden reducir la duración total de los viajes en un 20% si se sigue la regla, el primero que llega el primero que se sirve.

CAPITULO 3. DEFINICION DEL PROBLEMA

3.1 Entorno del problema

La empresa de alimentos, sobre la cual se partió para este trabajo, cuenta con un centro de distribución ubicado en Monterrey, NL. Aproximadamente el 30% de los productos se fabrican en la planta de Monterrey, por lo que existe un 70% que es recibido primero en el centro de distribución y luego se transporta al área de recolección para posteriormente hacerlos llegar a los clientes en pedidos específicos. Se cuenta con un total de 133 productos que son distribuidos a los clientes.

Dentro del área de recolección, los productos están almacenados en cajas y aproximadamente el 95% de los productos son tomados por pieza y no por caja. El área de recolección cuenta con 1 estante dividido en 3 estaciones de trabajo iguales, las cuales cuentan con un sistema de gravedad para la toma de los productos, donde al retirar la primera caja automáticamente la siguiente se posiciona en el área frontal, lo cual se puede observar en la Figura 3.1.

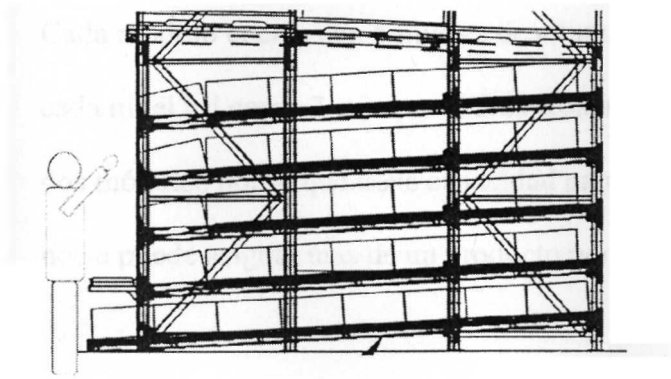


Figura 3.1 Sistema de gravedad en el área de recolección.

Cada estación cuenta con 4 recolectores que trabajan de la misma manera así como con un resurtidor encargado de realizar los reabastos cada vez que se requiera.

Cada estación cuenta con los mismos productos y se procura tener la misma cantidad en cada una de ellas. Los productos de mayor volumen se encuentran en el área de recolección, y los productos de bajo volumen se concentran en una sola área de reserva que sirve para todas las estaciones, la cual está situada justo enfrente del área de recolección.

El área de recolección se ilustra en la Figura 3.2:

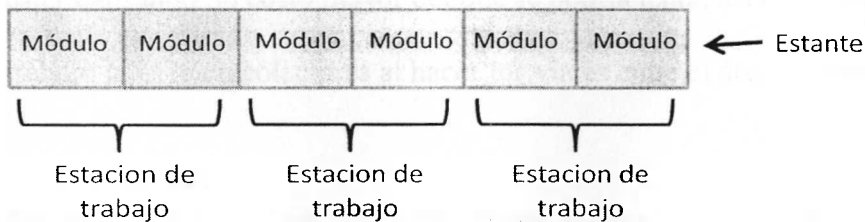


Figura 3.2 Área de recolección

Cada modulo cuenta con 5 niveles de altura, y una capacidad de 7 cajas de profundidad en cada nivel así como 7 cajas en el área frontal; una estación de trabajo está conformada por dos módulos por lo que tiene capacidad para 70 productos, tomando en consideración que no se puede asignar más de un producto por espacio frontal.

Al área de recolección llegan los productos 1 vez al día por la mañana antes de iniciar con la tarea de la recolección, con el pronóstico de requerimiento de cada producto y conforme se vaya requiriendo, se van realizando reabastos de los productos. La mayoría de los productos se dejan en el área delantera, y solo aquellos que ya no tengan espacio son mandados a un área de reserva.

3.2 Situación que se requiere mejorar

Los productos son acomodados en el área delantera de acuerdo a la experiencia de los recolectores y al pronóstico de la demanda, sin embargo, no se cuenta con un método o proceso que asigne correctamente cuales y en qué cantidades se van a asignar los productos al área delantera, situación por la cual, el acomodo actual puede resultar no ser el optimo y estar causando un costo mayor del que se podría tener, así como estar generando exceso de trabajo para los recolectores al hacer los viajes entre el área de reserva y el área delantera.

Los métodos de asignación de SKUS que se encontraron ya publicados, no toman en cuenta restricciones de espacios enteros ni limitantes de capacidad para este tipo de situaciones, por lo que no pueden ser utilizados en almacenes cuando el espacio asignado no está basado en fracciones, sino en números enteros.

Así mismo, por tratarse de productos perecederos, es necesario contemplar que los productos no pueden ser almacenados por un largo periodo de tiempo, por lo que es necesario realizar por lo menos un reabasto al inicio del día para asegurarse que los productos que se almacenan para posteriormente ser entregados a los clientes, estén en buen estado para ser comprados por los consumidores finales.

CAPITULO 4. MODELOS

Para resolver el problema de cuales SKUS asignar al área delantera y en qué cantidades, se recurrió al modelo propuesto por Bartholdi y Hackman en el libro Warehouse & distribution science (2010), el cual se describe a continuación.

4.1 Modelo propuesto por Bartholdi y Hackman

En el problema de selección de productos a colocar en el área delantera de un almacén, Hackman y Rosenblat (1990) proponen un modelo basado en el flujo por SKU, el cual esta expresado en volumen por año:

$$f_i = \left(\frac{\text{productos/año}}{\text{productos/contenedor}} \right) \text{volumen/contenedor} \quad 4.1$$

Mediante la asignación de volumen óptimo de acuerdo a n numero de productos, se busca minimizar el costo total del sistema, tomando en cuenta el costo de realizar una recolección tanto en el área delantera como en reserva, así como el costo por reabasto. El modelo propuesto por Bartholdi y Hackman (1990) es el siguiente:

$$\min \sum_i^n \left(c_1 p_i + \frac{c_r f_i}{v_i} \right) x_i + c_2 p_i (1 - x_i) \quad 4.2$$

$$\sum_i^n v_i x_i \leq 1 \quad 4.3$$

$$v_i > 0 \quad 4.4$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad 4.5$$

Donde:

c_1 : Costo de realizar un pick en el área frontal

c_2 : Costo de realizar un pick en el área de reserva

c_r : Costo de reabasto en el área frontal

p_i : Recolecciones del SKU i

f_i : Flujo del SKU i

v_i : Volumen óptimo asignado al SKU i

x_i : Variable binaria de decisión

En la función objetivo 4.2 se busca **minimizar** el costo total de las recolecciones, tomando en cuenta el costo de recolección en área delantera y de reabasto para los productos que sean asignados, y el costo de recolección en el área de reserva para los que no.

En la restricción 4.3 se busca que el total de las fracciones de volumen asignadas v_i no exceda de 1, ya que el 1 representa el **100%** del volumen disponible en el área delantera.

La restricción 4.4 dice que, si un producto va a tener una fracción del volumen en el área delantera, esta fracción tiene que ser **mayor a cero**, es decir, que efectivamente se le asigne una fracción del volumen disponible si va a ser colocado en el área delantera.

El volumen asignado a cada producto se basa en el flujo de cada SKU definido en la ecuación 4.1, por lo que a cada producto a almacenar en el área delantera se le asigna una fracción óptima de volumen:

$$v_i^* = \frac{\sqrt{f_i}}{\sum_j \sqrt{f_j}} \quad 4.6$$

El número de reabastos de cajas de acuerdo al volumen asignado en la ecuación 4.6 a cada producto, se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{f_i}{v_i} \quad 4.7$$

Dicho modelo propone una solución óptima cuando es posible asignar fracciones de volumen a cada SKU sin importar el número de productos, sin embargo, en el problema en análisis es necesario asignar espacios mediante números enteros y con capacidad limitada de cajones disponibles, situación por la cual si el número de productos excede el número de cajones disponibles, no es posible asignar todos los productos al área delantera como en el modelo propuesto por Bartholdi y Hackman.

4.2 Adaptación del modelo propuesto por Bartholdi y Hackman

El modelo propuesto por Bartholdi y Hackman (1990) nos da una solución óptima sobre que fracción de volumen asignar a cada producto del área delantera, sin embargo, asignar fracciones de volumen no siempre es posible en la práctica.

En la empresa de alimentos, de la cual se parte para este trabajo, los productos deben de ser asignados al área delantera mediante cajones frontales, por lo cual el espacio asignado a cada producto tiene que ser un número entero de cajones, no es posible asignar fracciones, y la suma de todo los espacios asignados no debe exceder la capacidad total.

Dado el propósito de esta tesis, surge la necesidad de realizar en esta investigación una adaptación del modelo original, por lo que se propone la primera adaptación al modelo, en la cual se busca el desarrollo de un modelo basado en que cada SKU a colocar en el área frontal requiere por lo menos un cajón del número de cajones disponibles, Z .

Debido a que el tipo de productos que se manejan en el caso en análisis, son productos perecederos, es necesario que se realice un reabasto diario para asegurarse que los productos se encuentren en estado óptimo, por lo que continuando con la contribución de este trabajo se realiza la segunda adaptación al modelo, tomando de base, demanda y recolección diarias, y no datos anuales como los que se utilizan en el modelo original.

En el artículo de Hackman y Rosenblatt (1990) se propone un modelo basado en el flujo medido en volumen por año. Sin embargo, como la finalidad de esta tesis es desarrollar un

modelo de asignación para productos perecederos y partiendo del problema en análisis, se tiene la situación donde los productos son almacenados en cajas del mismo tamaño, y de acuerdo al tamaño de cada SKU es el número de productos que se acomodan en cada caja, el volumen cúbico por producto no es de importancia en la decisión de que productos incluir en el área delantera, ya que lo que se toma en cuenta es la demanda diaria en cajas, por lo que en este trabajo se propone la tercera adaptación al modelo, teniendo un modelo basado en la demanda diaria en cajas en vez del flujo, que se refiere a volumen cúbico anual por producto, como se expresa en la ecuación 4.1.

Basándonos en la demanda diaria en cajas, se propone la cuarta adaptación para el desarrollo del modelo en este trabajo, donde el número de reabastos de cajas en unidades enteras necesarios por SKU está dado por la siguiente ecuación:

$$r_i = \left\lceil \frac{d_i}{va_i} \right\rceil \quad \forall i \quad 4.8$$

Donde:

r_i : Reabastos para el producto i

d_i : Demanda en cajas del producto i

x_i : Cajones asignados al producto i

V : número de cajas máximo de colocar por espacio frontal

Debido a que la información proporcionada está basado en demanda unitaria por producto y no en cajas, la demanda para la adaptación del modelo se cálculo de la siguiente manera:

$$d_i = \left\lceil \frac{\text{demanda en piezas}}{\text{piezas por caja}} \right\rceil \quad 4.9$$

De acuerdo a los objetivos de esta investigación, se resumen a continuación las adaptaciones propuestas sobre el modelo original propuesto por Bartholdi y Hackman, para poder ser utilizado en almacenes con productos perecederos:

1. Cada SKU a colocar en el área frontal requiere por lo menos un cajón del número de cajones disponibles, Z .
2. Modelo basado en datos diarios en vez de datos anuales.
3. Modelo basado en la demanda diaria en cajas en vez del flujo, definido en la ecuación 4.1.
4. Numero de reabastos diarios de cajas en unidades enteras definido en la ecuación 4.8.

Por lo que el modelo propuesto en esta investigación se presenta a continuación:

$$\min \sum_{i=1}^n [(c_1 p_i + c_r r_i) x_i + c_2 p_i (1 - x_i)] \quad 4.10$$

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i \leq Z \quad 4.11$$

$$r_i a_i \geq \frac{d_i}{v_i} \quad \forall i \quad 4.12$$

$$(r_i - 1) a_i \leq \frac{d_i}{v_i} \quad \forall i \quad 4.13$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad 4.14$$

$$a_i \text{ entero } \forall i \quad 4.15$$

$$a_i \geq 1 \forall i \quad 4.16$$

$$r_i \geq 0 \forall i \quad 4.17$$

Donde:

c_1 : Costo de realizar una recolección en el área delantera

c_2 : Costo de realizar una recolección en el área de reserva

c_r : Costo de reabasto en el área delantera

p_i : Recolecciones del SKU i

x_i : Variable binaria de decisión

a_i : Numero de cajones en el área frontales asignados al SKU i

r_i : Reabastos del SKU i

d_i : Demanda en cajas del SKU i

z : numero de cajones frontales disponibles

V : Número máximo de cajas posibles a colocar por espacio frontal

La función objetivo busca minimizar el costo total de recolección, tomando en cuenta el costo de recolección en el área delantera y el costo de reabasto para los productos que son asignados en el área adelantara, y el costo de recolección en el área de reserva para los que no.

La ecuación número 4.11, impone la restricción de que el número de cajones totales asignados no exceda la capacidad total, definiendo que solo se pueden asignar hasta z número de espacios disponibles. Las restricciones 4.12 y 4.13 son restricciones de ayuda que limitan que los reabastos por producto sean un número entero.

Así mismo se cuenta con la restricción 4.14 de la variable binaria de decisión, donde si el valor es 1, el producto se asigna al área delantera, 0 en caso contrario. Las ecuaciones 4.15 y 4.16, definen que al ser asignado al menos un cajón al producto i , tiene que ser un número entero.

El resultado del modelo es la selección de SKUS a colocar en el área delantera así como el número de cajones asignados a cada uno, al menor costo posible.

4.3 Modelo en ampl

Como parte del trabajo de esta tesis, para resolver el modelo en un programa computacional, se recurrió al solver Cplex 11.1. Para permitir la solución del modelo con este programa computacional, fue necesario reformular el modelo para tener un problema con función objetivo y restricciones lineales, ya que el modelo original no pudo ser resuelto en el programa.

El modelo replanteado en este trabajo con forma lineal fue el siguiente:

$$\min CT = \sum_{i=1}^n r_i c_r + \sum_{i=1}^n \sum_1^j c_1 p_i x_{ij} + \sum_{i=1}^n p_i c_2 - \sum_{i=1}^n \sum_1^j c_2 p_i x_{ij} \quad 4.18$$

$$r_i = \sum_1^j r_{ij} * x_{ij} \quad \forall i \quad 4.19$$

$$\sum_1^j x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \quad 4.20$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_1^j x_{ij} * v_{ij} \leq Z \quad 4.21$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \quad \forall j \quad 4.22$$

$$r_i \geq 0 \quad \forall i \quad 4.23$$

Donde:

c_1 : Costo de realizar una recolección en el área delantera

c_2 : Costo de realizar una recolección en el área de reserva

c_r : Costo de reabasto en el área frontal

p_i : Recolecciones del SKU i

x_{ij} : Variable binaria de decisión, donde si es asignado el valor de 1, el producto se incluye en el área delantera, y si se asigna 0, se incluye en el área de reserva.

r_i : Reabastos del SKU i

r_{ij} : Parámetro que indica los reabastos del SKU i con j cajones asignados

v_{ij} : Parámetro que indica el valor del número de cajones asignados

Z: numero de cajones disponibles en el área delantera

El modelo de solución tiene la estructura de un problema de asignación, donde la i representa el número de producto y la j el número de cajones asignados en el área delantera.

De tal manera que se tienen dos grupos de variables, la variable binaria de decisión x_{ij} así como los reabastos r_i .

El parámetro v_{ij} , es un parámetro de ayuda al solver que indica, que cuando se asignan j cajones al SKU i , los cajones van a tener el valor v_{ij} , es decir, si se asignan 2 cajones, el parámetro v_{ij} va a tener el valor de 2.

Para definir los valores del parámetro r_{ij} , se calcularon los reabastos del SKU i con j cajones, usando la ecuación propuesta previamente:

$$r_i = \left\lceil \frac{d_i}{vc_i} \right\rceil \quad 4.22$$

La restricción número 4.19 indica que, para cada SKU, el número de reabastos va a depender de la variable binaria de decisión x_{ij} , en base al valor que tome esta variable, se va a definir qué valor tomar de la tabla de reabastos definida en el parámetro r_{ij} .

La número 4.20 restringe que a cada SKU i solo se le puede asignar un número de cajones j , mientras que la número 4.21 es la restricción de no exceder la capacidad del área delantera.

Las restricciones 4.22 y 4.23, son las que definen la variable binaria x_{ij} , así como que el número de reabastos es número positivo o cero.

CAPITULO 5. METODOS DE SOLUCION

Para resolver el modelo adaptado descrito en el capítulo 4, ecuaciones 4.10 a 4.17, se utilizaron los siguientes métodos de solución:

- Algoritmo de eficiencia de trabajo
- Algoritmo Miope
- Solver Cplex

Sobre los cuales se presenta una descripción a continuación.

5.1 Algoritmo de eficiencia de trabajo propuesto por Bartholdi y Hackman

Bartholdi y Hackman (1990) proponen un algoritmo para seleccionar los productos que serán asignados en el área delantera.

Este algoritmo consiste en seleccionar los SKUS que tienen mayor ganancia por recurso consumido, que en este caso son horas de trabajo por unidad en el área delantera. Las ganancias para el producto i se expresan en la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{p_i}{\sqrt{f_i}}\right) \left(S \sum_{j \in S} \sqrt{f_j}\right) - c_r \left(\sum_{j \in S} \sqrt{f_j}\right)^2 \quad 5.1$$

Donde:

S: Conjunto de SKUS a almacenarse en el área delantera

p_i : Recolecciones del producto i

f_i : Flujo del producto i

c_r : Costo de reabasto

Sin embargo como todavía no se ha determinado el conjunto S a posicionar en el área delantera, se procede a acomodar los SKUS de acuerdo a su eficiencia de trabajo, ya que se sabe que acomodarlos de acuerdo a este término es equivalente a acomodarlos de acuerdo a su ganancia. La eficiencia de trabajo para el producto i se determina de la siguiente manera:

$$\frac{p_i}{\sqrt{f_i}} \quad 5.2$$

Acomodando los productos de mayor a menor eficiencia, nos define que productos contribuyen mas si son colocados en el área delantera, de esta manera, los productos que se encuentran en los lugares más altos de la lista son los que ofrecen mayor eficiencia de trabajo.

Basados en este principio, se presenta un algoritmo que define que productos se colocan en el área delantera y en qué cantidades:

- Acomodar todos los SKUS de mayor a menor eficiencia de trabajo
- Evaluar el costo total neto de no colocar ningún producto en el área delatara, después colocando solo el primer producto de la lista, después los primeros dos, y

así sucesivamente. Posteriormente se selecciona la estrategia con el menor costo total.

El volumen asignado por SKU en el área delantera así como sus reabastos, son calculados usando el modelo descrito anteriormente.

5.2 Adaptación del algoritmo de eficiencia de trabajo

Basándonos en el algoritmo propuesto por Hackman y Rosenblatt (1990), se realizó la adaptación para el caso en análisis para poder ser utilizado en almacenes donde se manejen productos perecederos. El modelo original está basado en la eficiencia de trabajo definida por el flujo de cada producto y las recolecciones anuales:

$$\frac{p_i}{\sqrt{f_i}} \quad 5.3$$

Para el propósito de esta investigación, el flujo no es representativo, ya que este toma en cuenta el volumen cúbico de cada producto, mientras que en la empresa de alimentos se tienen medidas estandarizadas de cajas en las cuales se almacenan, por lo que la variable representativa en nuestro caso es la demanda en cajas por día, por lo que se realizó la primera adaptación al método de solución para poder cumplir con los objetivos propuestos, definiendo el siguiente cambio:

$$f_i = d_i \quad 5.4$$

Realizando entonces la segunda adaptación al método, definiendo la eficiencia de trabajo de cada producto de la siguiente manera:

$$\frac{p_i}{\sqrt{d_i}} \quad 5.5$$

La tercera adaptación que se realizó para poder utilizar el algoritmo basado en la eficiencia de trabajo en productos perecederos, fue transformar el volumen asignado a números enteros. Para el volumen el criterio fue la parte decimal, si el valor asignado tenía una fracción decimal menor a .5, el redondeo fue hacia abajo:

$$[v_i]$$

Si la fracción decimal era mayor a .5 el redondeo fue hacia arriba:

$$[v_i]$$

Para los reabastos se tomó el mismo criterio utilizado anteriormente, realizando entonces la cuarta adaptación:

$$r_i = \left\lceil \frac{d_i}{vc_i} \right\rceil \quad \forall i \quad 5.6$$

El algoritmo de solución propuesto en este trabajo fue el mismo:

- Acomodar todos los SKUS de mayor a menor eficiencia de trabajo

- Evaluar el costo total neto de no colocar ningún producto en el área delatara, después colocando solo el primer producto de la lista, después los primeros dos, y así sucesivamente. Posteriormente se selecciona la estrategia con el menor costo total.

Para adaptar el modelo a capacidad limitada como se definió en esta tesis, se realiza la adaptación número cinco, añadiendo la restricción del volumen disponible, es decir, el número de iteraciones está limitado a los Z cajones frontales disponibles, por ejemplo, si el número de cajones Z es igual a 50, no se pueden hacer más de 50 iteraciones, ya que al hacer la iteración 51 se estarían agregando 51 productos, los cuales estarían excediendo la capacidad del sistema.

Las adaptaciones al algoritmo de eficiencia de trabajo realizadas en este trabajo se resumen a continuación:

1. Algoritmo basado en la demanda diaria en cajas en vez del flujo, definido en la ecuación 4.1.
2. La eficiencia de trabajo de cada producto se define en la ecuación 5.5.
3. Transformar el volumen asignado a números enteros.
4. Reabastos en número enteros definido en la ecuación 5.6.
5. El número de iteraciones del algoritmo está limitado a los Z cajones frontales disponibles.

5.3 Algoritmo miope

Para el desarrollo del algoritmo miope, se partió de una etapa inicial y una etapa de asignación, donde en cada una de ellas se iba asignando al área frontal el SKU que mayor ahorro tenía.

Para la primera etapa del algoritmo, el ahorro para cada SKU se definió de la siguiente manera:

$$a1_i = p_2 * p_1 - p_1 * p_i - c_r * r_i \quad 5.7$$

Donde los reabastos están basados en la asignación de un solo cajón frontal a cada SKU.

El primer SKU a ingresar al área delantera será aquel que mayor ahorro tenga, teniendo como restricción que solo se puede ingresar por primera vez con un solo cajón, y posteriormente se pueden ir añadiendo más cajones asignados, uno por uno, si el ahorro sigue siendo mayor que el resto de los SKUS. El ahorro de ingresar un cajón más de un SKU ya asignado, está definido como se muestra a continuación:

$$a2_i = (p_2 * p_i - p_1 * p_i - c_r * r_i) - a1_i \quad 5.8$$

Mismo criterio se sigue para ir añadiendo cajones sucesivos. El proceso acaba cuando ya se han asignado todos los cajones disponibles en el área delantera, por lo que los que no

fueran asignados, irán al área de reserva. El costo total de la solución se puede calcular de la misma manera hecha anteriormente:

$$CT = \sum_{i=1}^n [(c_1 p_i + c_r r_i) x_i + c_2 p_i (1 - x_i)] \quad 5.9$$

5.4 Solver Cplex

Para resolver el modelo adaptado, ecuaciones 4.10 a 4.17, con un programa computacional, se recurrió al Solver Cplex, el cual logro resolver las diferentes instancias, que se describirán en el siguiente capítulo, en tiempos muy cortos, que no excedían de los 10 segundos.

Con el lenguaje de modelación AMPL, Cplex no logro reconocer el modelo original cuadrático, por lo que fue necesario la reformulación descrita en el capítulo 4, en las ecuaciones 4.18 a 4.23, en el lenguaje de programación AMPL, por lo que la variable binaria de decisión era 1 cuando se asignaba un SKU con N numero de cajones.

CAPITULO 6. EXPERIMENTACION COMPUTACIONAL

6.1 Proceso de generación de instancias

Como base inicial para la generación de instancias, se tomaron los datos proporcionados por la empresa de alimentos, los cuales eran la demanda mensual por SKU y el número de productos por caja de cada SKU, de las 3 estaciones de trabajo.

Con fines de realizar el experimento a nivel de estación de trabajo, la demanda fue dividida en tres, número de estaciones con las que se cuenta.

En una empresa de alimentos, los reabastos ocurren de manera diaria, debido a la duración y caducidad de los productos. Al principio del día se realiza un reabasto general de todos los productos de acuerdo al pronóstico de demanda, y durante el transcurso de las recolecciones se van realizando los reabastos requeridos.

Para tener los datos en una base diaria se realizaron los siguientes cálculos:

- Para convertir los datos a base mensual por estación:

$$\left[di \text{ mensual} / \text{estacion} = \frac{di \text{ mensual}}{3} \right] \quad 6.1$$

- Para convertir los datos a base diaria:

$$\left[di \text{ diario} = \frac{di \text{ mensual} / \text{estacion}}{24} \right] \quad 6.2$$

$$\left[Di = \frac{di \text{ diario}}{\text{piezas/caja}} \right] \quad 6.3$$

Para la creación de instancias, se generaron números aleatorios entre 0 y 1 para definir el conjunto de SKUS a tener en cada instancia, y se multiplicó el número aleatorio por el total de SKUS, utilizando la siguiente fórmula:

$$[sku = rand * (\text{Numero total de skus} - 1)] \quad 6.4$$

De esta manera, se definió el grupo de SKUS que formarían cada instancia, dependiendo del tamaño de la misma, tomando los datos originales como la demanda chica.

Para generar los datos con demanda mediana y grande, se aumento la di en un 100% y 200% respectivamente, y para obtener una aleatoriedad de la información se definió un rango:

$$\text{Limite inferior} = \left[di * \text{aumento} - \frac{di * \text{aumento} - di}{2} \right] \quad 6.5$$

$$\text{Limite superior} = \left[di * \text{aumento} + \frac{di * \text{aumento} - di}{2} \right] \quad 6.6$$

Posteriormente se genero un número aleatorio, el cual define cual será el incremento en la demanda dentro del rango especificado:

$$\text{incremento en demanda} = \text{aleatorio} * (di * 2 - di) \quad 6.7$$

Definiendo entonces la nueva di de la siguiente manera:

$$[di \text{ mediana} = \text{limite inferior} + \text{incremento}] \quad 6.8$$

Se sigue el mismo proceso para calcular la demanda grande, modificando el aumento a un 200% y posteriormente se calcula la nueva Di de la misma manera que se hizo anteriormente.

Para obtener los datos del parámetro 3, recolecciones, se siguió la misma regla para aumentar la demanda, generando un rango y un número aleatorio que definirá el incremento.

6.2 Definición de instancias

Para fines de conocer la eficiencia de los modelos formulados, se generaron instancias basadas en parámetros y rangos propuestos, los cuales se muestran en la tabla 7.1:

PARAMETROS		RANGOS				
		1	2	3	4	
1	SKUS	50	100	150		
2	DEMANDA	CHICA (Original)	MEDIANA (Doble)	GRANDE (Triple)	-	
3	PIEZAS/PICK	ORIGINAL	DOBLE		-	
4	% DISPONIBLE	50%	90%	-	-	
5	COSTOS	C1	2	2	2	2
		C2	3	4	3	4
		CR	10	10	15	15

Tabla 7.1 Parámetros y rangos para instancias computacionales

Estas variantes fueron definidas con la finalidad de tener datos con las variaciones más importantes que se pueden tener y realizar una comparación con el resultado obtenido a través del modelo.

Los datos iniciales sobre los cuales se baso para la generación de instancias en los parámetros de demanda y recolecciones, fueron los proporcionados por la empresa de alimentos, sobre los datos reales en un mes de operación del almacén.

Para la etapa de experimentación se elaboraron 6 instancias, dos para cada tamaño del experimento definido en el parámetro 1. Las cuales fueron adaptadas en base a los parámetros 2, 3, 4 y 5, teniendo un experimento con 288 instancias.

6.3 Comparación de los métodos propuestos

Para obtener resultados sobre los dos métodos propuestos, se recurrió al uso de Excel, mientras que la adaptación del modelo propuesto fue resuelta utilizando el solver Cplex.

Una comparación de los resultados obtenidos en las 288 instancias se muestra en la Tabla 7.2:

	50 SKUS	100 SKUS	150SKUS	DIFERENCIA PORCENTUAL PROMEDIO
Algoritmo de eficiencia de trabajo	0.43%	0.45%	0.31%	0.40%
Algoritmo Miope	0.68%	2.46%	1.45%	1.53%

Tabla 7.2 Comparación de resultados obtenidos con los métodos de solución y CPLEX

Tomando como el resultado óptimo el obtenido con el solver Cplex, se puede observar que los dos métodos propuestos obtienen soluciones muy cerca del óptimo. El algoritmo de solución de eficiencia de trabajo se encuentra en promedio solo un .40% arriba del óptimo, mientras que el algoritmo miope en un 1.53%.

En la tabla 7.3 se puede observar el número de instancias en las que el algoritmo de eficiencia de trabajo obtuvo mejores resultados que el miope, y en la tabla 7.4 se muestran el número de instancias donde los dos algoritmos obtuvieron el mismo resultado, mostrando que tienen a funcionar de manera similar en instancias pequeñas solamente.

50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS	TOTAL
53.13%	79.17%	35.42%	55.90%

Tabla 7.3 Instancias en las que el algoritmo de eficiencia de trabajo fue mejor que el miope

50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS	TOTAL
11.46%	0.00%	0.00%	3.82%

Tabla 7.4 Instancias en que los dos métodos de solución obtuvieron el mismo resultado

La comparación realizada entre los dos métodos propuestos, muestra que el que obtiene mejores resultados de los dos es el algoritmo basado en la eficiencia de trabajo. Asimismo, se puede observar que los dos métodos de solución obtienen mejores resultados cuando se trabaja con instancias pequeñas.

6. 4 Análisis de los parámetros

A continuación se muestra un análisis de los resultados obtenidos con los métodos de solución, enfocándonos en cada parámetro que fue modificado en las instancias, a fin de identificar el efecto que tienen las modificaciones con los resultados obtenidos.

6.4.1 Tamaño de la demanda

En la tabla 7.5 podemos ver una comparación de los resultados obtenidos con los tres tipos de demanda:

	ALGORITMO DE EFICIENCIA DE TRABAJO			ALGORITMO MIOPE			DIFERENCIA PORCENTUAL PROMEDIO POR TAMAÑO DE DEMANDA
	50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS	50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS	
DEMANDA CHICA (ORIGINAL)	0.579%	0.330%	0.377%	0.151%	0.469%	0.081%	0.331%
DEMANDA MEDIANA (DOBLE)	0.325%	0.698%	0.245%	1.115%	2.097%	0.910%	0.898%
DEMANDA GRANDE (TRIPLE)	0.271%	0.200%	0.218%	0.081%	0.910%	2.949%	0.772%
DIFERENCIA PORCENTUAL PROMEDIO POR METODO DE SOLUCION	0.360%			0.974%			

Tabla 7.5 Análisis de parámetro demanda con los diferentes métodos de solución y CPLEX

En la Tabla 7.5, se puede observar que conforme la demanda se incrementa el algoritmo de eficiencia de trabajo tiende a arrojar mejores resultados que con demanda pequeña y mediana, caso contrario con el algoritmo miope, ya que al aumentar el tamaño de la demanda, se aleja más del resultado óptimo, debido a que este método, cuando un producto tiene una demanda muy grande tiende a asignarle un mayor número de cajones que al resto de los productos, limitando el número de productos a colocarse en el área delantera, alejándose de la mejor combinación de SKUS a colocar en dicha área.

6.4.2 Costos propuestos

En la tabla 7.6, se muestra una comparación de los resultados obtenidos con las diferentes combinaciones de costos propuestos:

	C1=2 C2=3 Cr=10	C1=2 C2=4 Cr=10	C1=2 C2=3 Cr=15	C1=2 C2=4 Cr=15
Algoritmo de eficiencia de trabajo	0.16%	0.74%	0.16%	0.39%
Algoritmo miope	1.26%	0.78%	2.21%	1.29%

Tabla 7.6 Análisis de parámetro costo con los diferentes métodos de solución

Como se puede observar en la Tabla 7.6, el algoritmo de eficiencia de trabajo, obtiene mejores resultados cuando los costos de recolección en el área delantera y en el área de reserva son similares, sin importar el costo de reabasto, caso contrario con el algoritmo miope, que entre mayor sea la diferencia entre los diferentes costos, mejores resultados da, ya que detecta más fácilmente los productos que mayores ahorro generarían al ser colocados en el área delantera.

6.4.3 Capacidad del área delantera

En la tabla 7.7 se muestra una comparación de los resultados obtenidos con el 50% de capacidad del área delantera y con el 90%:

	50SKUS		100SKUS		150SKUS	
	50%	90%	50%	90%	50%	90%
Algoritmo de eficiencia de trabajo	0.62%	0.16%	0.67%	0.14%	0.37%	0.19%
Algoritmo Miope	0.31%	0.91%	2.21%	2.25%	1.02%	1.61%

Tabla 7.7 Análisis de parámetro capacidad con los diferentes métodos de solución

En la Tabla 7.7, las mayores diferencias de los resultados con el óptimo se observan con la instancia de tamaño mediano, de 100 productos, y en las demás instancias, los resultados se tienden a alejar más del óptimo cuando se amplía la capacidad. Esto se puede explicar ya que cuando la capacidad aumenta también aumentan las posibles combinaciones de productos y números de cajones asignados, por lo que es más fácil que a un solo producto se le sean asignados más cajones del área delantera si cuenta con la disponibilidad, situación que limita el espacio para incluir nuevos productos.

6.4.4 Recolecciones

En la tabla 7.8 se muestra una comparación de los resultados obtenidos de acuerdo al parámetro de recolecciones, donde las recolecciones originales son los datos reales proporcionados por la empresa de alimentos y las recolecciones al doble, es el aumento sobre los originales, descrito previamente en este capítulo.

	Recolecciones originales			Recolecciones al doble		
	50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS	50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS
Algoritmo de eficiencia de trabajo	0.23%	0.47%	0.22%	0.55%	0.35%	0.34%
Algoritmo Miope	1.04%	3.03%	2.19%	0.19%	1.42%	0.43%
DIFERENCIA PORCENTUAL PROMEDIO	0.64%	1.75%	1.20%	0.37%	0.89%	0.39%

Tabla 7.8 Análisis de parámetro recolecciones con los diferentes métodos de solución

De la Tabla 7.8 se puede notar que el Algoritmo de eficiencia de trabajo, arroja resultados similares cuando las recolecciones por producto aumentan, también se puede observar que el Algoritmo miope, tiende a arrojar mejores resultados cuando las recolecciones por producto se incrementan, debido a que es más fácil identificar cuáles son los productos que deben ser asignados al área delantera, ya que entre más recolecciones haya, es mayor la diferencia en costo entre asignar un producto al área delantera o al área de reserva de acuerdo a los costos de recolección de cada área. Mostrando resultados significativamente más cercanos al óptimo, el algoritmo de eficiencia de trabajo, cuyo principio como se menciono anteriormente, tomaba en consideración las recolecciones diarias.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

7.1 Conclusiones

Muchas investigaciones se han hecho tomando como punto de partida el problema de asignación de productos al área delantera y al área de reserva. Sin embargo, en la actualidad cada situación es diferente, y no todos los modelos pueden ser aplicados en la realidad, por lo que es necesaria la adaptación de los mismos.

En la actualidad se pueden observar muchos tipos de almacenes y políticas de almacenaje, por lo que no siempre lo que aplica a uno puede ser utilizado por otro, sin embargo con esta investigación se puede concluir que es posible utilizar las investigaciones previamente documentadas mediante la adaptación de los modelos y métodos de solución, como se mostro en los capítulos 4 y 5, cumpliendo con el objetivo 1 y 2 de esta investigación.

Mediante las adaptaciones realizadas en esta investigación, fue posible utilizar el modelo documento por Bartholdi y Hackman para el caso en análisis así como el algoritmo de eficiencia de trabajo propuesto por los mismos autores.

En el capítulo 4, se realizo la adaptación al modelo propuesto por Bartholdi y Hackman sobre asignación de productos al área delantera, logrando formular un modelo con capacidad limitada y posible de asignar espacios enteros de volumen. Mediante el uso de reabastos diarios, fue posible utilizar este modelo en almacenes donde se cuente con

productos perecederos, donde los productos no pueden ser almacenados por largos periodos de tiempo.

Así mismo, en el capítulo 4 se formulo un modelo de forma lineal, el cual puede ser utilizado en programas que no permitan el uso de ecuaciones cuadráticas o que no funcionan de manera optima con este tipo de problemas. Mediante la experimentación computacional, se observo que aun mediante la relajación lineal, el modelo formulado arroja soluciones enteras y factibles.

En esta investigación, se comprobó que no se necesita siempre de programas computacionales muy avanzados o difíciles de conseguir y dominar para su resolución, ya que mediante el uso de algoritmos, como el algoritmo miope propuesto en el capítulo 5, de acuerdo al objetivo 3 de esta investigación, es posible utilizar las herramientas con las que diariamente se trabaja para lograr obtener resultados que contribuyan a una disminución de los costos operativos y administrativos.

En el capítulo 5, mediante las adaptaciones propuestas del algoritmo de eficiencia de trabajo, se logro utilizar este método de solución para resolver el modelo adaptado a productos perecederos, logrando resultados muy cercanos al óptimo. Así mismo, mediante la generación de un nuevo algoritmo de solución miope, se propuso una alternativa de solución fácil de utilizar y con resultados muy similares al algoritmo de eficiencia de trabajo y al solver Cplex.

Cumpliendo con el objetivo 4 de esta investigación, se puede concluir con los experimentos computacionales que los modelos y métodos de solución propuestos en base a las adaptaciones, arrojan resultados buenos y muy cercanos al óptimo, por lo que pueden resultar de gran utilidad en las empresas que almacenen productos perecederos o que manejan un tipo similar de almacén al problema descrito.

Con el desarrollo de este trabajo, se comprobó mediante la etapa de experimentación, que existen instancias donde puede resultar obvio asignar al área delantera con mayor número de cajones a los productos con mayor demanda, sin embargo, esto no siempre resulta en la solución óptima, ya que el resultado estaría alterando la mejor combinación de productos que logre optimizar los recursos y disminuir el costo total, por lo que es de vital importancia no dejar a la experiencia de los trabajadores la decisión de asignación de productos al área delantera, ya que como menciona Frazelle (2002), la mayoría de los almacenes gastan entre el 10% y 30% más por año de lo que deberían, ya que se estima que menos del 15% de los productos que manejan se encuentran correctamente asignados a su lugar de almacenaje.

Esta investigación puede servir de base a empresas que manejen productos perecederos, para realizar una comparación sobre los sistemas actuales que se manejan en el almacén y la asignación obtenida con el método y los modelos propuestos en base a las adaptaciones, a fin de realizar cambios que contribuyan a mejoras productivas y por ende, económicas.

El modelo y los métodos de solución propuestos, pueden ser aplicados en cualquier tipo de almacén manual donde se manejen unidades de espacio enteras y con capacidad limitada,

sin importar el tipo de producto que se maneje, siempre y cuando el volumen por producto o por medio de almacenamiento (cajas, tarimas, etc.) sea el mismo para cada SKU.

El modelo puede ser utilizado para cualquier tamaño de demanda y variedad de productos con los que se cuenten, tendiendo a obtener mejores resultados en situaciones donde se cuenten con aproximadamente 50 tipos de productos.

Si la demanda que se maneja de los productos tiende a ser muy alta, se recomienda utilizar el algoritmo de eficiencia de trabajo, y si la demanda es media o baja, se puede utilizar tanto el algoritmo de eficiencia de trabajo como el algoritmo miope.

7.2 Futuras investigaciones

Sobre el trabajo realizado en esta investigación, se hacen las siguientes recomendaciones sobre investigación futuras que pueden ayudar a generar mejores resultados adaptando el modelo a otros tipos de almacenes y operaciones:

- Adaptación del modelo a almacenes donde no son necesarios reabastos diarios, ya que en el modelo propuesto se toma de base que se hace un reabasto al día, mientras que existen otras situaciones donde los reabastos se van realizando de acuerdo a la demanda y al periodo de tiempo que se maneje, puede realizarse en base a demanda semanal, mensual o anual.

- Adaptación del modelo cuando los productos que se almacén tienen diferentes volúmenes, por lo que un solo producto puede ocupar más unidades de espacio que otro. Para esta situación se podría agregar una restricción que indique los espacios mínimos requeridos por producto si son colocados en el área delantera.
- Para utilizar este modelo en productos perecederos donde no se realiza un reabasto general diario, se puede añadir una restricción que indique el tiempo máximo que un producto puede permanecer en el almacén, en base a su fecha de elaboración y caducidad, de tal manera que el modelo genere una solución donde los productos siempre están en buenas condiciones y pueden ser entregados a los clientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acreman, K.B. (1990). Practical Handbook of Warehousing. Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
- Bartholdi, J.J., Hackman, S.T., 2005. Warehouse & distribution science, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga.
- B. Rouwenhorst, B. Reuter , V. Stockrahm , G.J. van Houtum , R.J. Mantel , W.H.M. Zijm (2000). Warehouse design and control: Framework and literature review, European Journal of Operational Research, 22(3), 515-533
- Bozer, Yavuz Ahmet (1985). Optimizing throughput performance in designing order picking systems, Material Handling Research Center, Atlanta, Ga.
- Coyle, J.J., Bardi, E.J. and Langley, C.J. (2003). The Management of Business Logistics: A supply Chain Perspective, South-Western, Mason, OH.
- E.H. Frazelle, S.T. Hackman, U. Passy, L.K. Platzman (1994). The forward-reserve problem, in: T.A. Ciriani, R.C. Leachman (Ed.), Optimization in Industry 2, 43-61.
- ELA/AT Kearney (2004). Excellence in Logistics 2004, ELA, Brussels.
- Frazelle. E. (2002). World-class Warehousing and Material Handling. McGraw-Hill, New York, NY.
- Hall, R.W.(1993). Distance approximation for routing manual pickers in a warehouse. IIE Transactions, 25 (4), 76–87.
- Heragu, S. S., Huang, C. S., Mantel, R. J. Schuur, P. B. (2003). A mathematical model for warehouse design and product allocation, International Journal of Production Research, 43 (2), 327-338.
- J Gu, M Goetschalckx and L F McGinnis (2010). Solving the forward-reserve allocation problem in warehouse order picking systems, Journal of the Operational Research Society, 61, 1013–1021.
- J.P. van den Berg, G.P. Sharp (1998). Forward-reserve allocation in a warehouse, European Journal of Operations Research, 111 (1), 98-113.
- J.P. van den Berg, W.H.M. Zijm (1999). Models for warehouse management: Classification and examples, International Journal of Production Economics, 59 (3), 519-528

Rene de Koster , Tho Le-Duc, Kees Jan Roodbergen R. de Koster et al (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review, *European Journal of Operational Research*, 182, 481–501

Sebastian Henn, Sören Koch, Karl F Doerner, Christine Strauss, Gerhard Wäscher. (2010). Metaheuristics for the Order Batching Problem in Manual Order Picking Systems, *Business Research*, 3 (1), 82-106.

ST. Hackman, M.J. Rosenblatt (1990). Allocating items to an automated storage and retrieval system, *IIE Transactions* 22 (1), 7-14.

Tim D Nguyen, John S Usher, Gail W DePuy (2005). The Forward-Reserve Problem with Seasonal Demand, *IIE Annual Conference*.

Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H., Tanchoco, J.M.A.(2003). *Facilities Planning*. John Wiley & Sons, NJ.

ANEXOS

Asignación de productos perecederos al área de despacho con capacidad limitada

En el desarrollo de este trabajo se presenta una adaptación del modelo documento por Hackman y Rosenblatt (1990) sobre la asignación de productos al área delantera, en este caso para productos perecederos, donde la asignación de espacios es mediante unidades enteras y con una capacidad limitada. Además se presentan dos métodos de solución al modelo: la adaptación del algoritmo de eficiencia de trabajo propuesto por los mismos autores y un algoritmo miope. Se presentan además los resultados computacionales sobre las instancias generadas.

Palabras Clave: Recolección, reabastos, área delantera, área de reserva.

1. Introducción

El éxito o fracaso de un negocio, viene relacionado de un gran número de decisiones y estrategias a lo largo de la cadena de suministro, en la aplicación de la administración actual, el almacén es un medio para lograr economías en aumento y para incrementar las utilidades de la empresa, si se toman las decisiones correctas.

La recolección de órdenes se refiere al proceso de obtener los productos de su ubicación en el almacén para satisfacer las órdenes de los clientes. Constituye el 65% del costo total de un almacén (Coyle, 2003). Aunque la recolección parece una tarea relativamente simple de desarrollar, se realiza de muchas maneras distintas en las compañías.

La recolección de órdenes es el proceso más importante en la mayoría de los almacenes, ya que consume la mayor cantidad de mano de obra así como determina el nivel de servicio experimentado por los clientes. La importancia de la recolección de productos se ha incrementado en los últimos años, con la presión de reducir inventarios mientras las líneas de producción se amplían.

En trabajos previos, se han desarrollado modelos para determinar la asignación de los productos en el almacén, sin embargo pueden resultar poco adaptables a situaciones de la realidad, por la continuidad del planteamiento o por las situaciones específicas sobre las cuales fueron desarrollados. En muchas ocasiones pueden ser difíciles de utilizar por los requerimientos computacionales así como la inversión y el tiempo requerido.

Durante el desarrollo de este trabajo, se hará en enfoque en la tarea de recolección de órdenes en una compañía que maneja productos perecederos y donde la asignación de los productos se basa en espacios enteros, a fin de desarrollar un modelo que permita tomar las mejores decisiones al menor costo posible.

Entre las investigaciones que se han documentado sobre este tema, la más sobresaliente y que ha servido de base para otras investigaciones, es la de Hackman y Rosenblatt (1990) quienes fueron los primeros en investigar el problema del área de

reserva-delantera, definiendo cuales productos asignar en el área delantera y en qué cantidad. Ellos consideraron un almacén compuesto por un área delantera pequeña con un sistema automático de colocación y obtención de productos, así mismo un área de reserva de capacidad infinita manejado por un sistema manual o semiautomático. El problema fue resuelto por medio de un heurístico miope donde los productos son asignados al área delantera de acuerdo a su deseabilidad de ser asignados.

El modelo matemático propuesto por ellos tiene un grupo de variables enteras que indican si un producto es asignado o no en el área delantera, y un conjunto de variables continuas que indican cuanto espacio en el área delantera se designa a cada producto de esta área. El objetivo consiste en maximizar el beneficio total del área delantera, el cual es, el ahorro entre realizar una recolección en el área delantera menos los costos de reabasto. Este modelo es similar al problema de la mochila, con la diferencia de que tiene un objetivo que no es lineal y que es discontinuo en cero.

Partiendo de esta investigación, Frazelle (1994) incorporo al heurístico desarrollado previamente, la variable del tamaño del área delantera, junto con la asignación de los productos a la misma, donde los costos del modelo para recolectar productos y sus reabastos dependen del tamaño del área delantera.

Entre otras investigaciones, se encuentra la de Heragu (2003), quien desarrollo un modelo matemático en el que se determina la mejor ubicación de los productos, tomando en cuenta las áreas funcionales de un almacén, así como el tamaño de las mismas. Una de las más recientes también es la de Nguyen (2005), presentando un modelo matemático para una variante del problema del área de reserva-delantera, en el cual se considera que la demanda de los productos cambia con el tiempo, lo que puede resultar en una incorrecta asignación de los productos en el almacén.

En este trabajo se propone una adaptación del modelo propuesto por Hackman y Rosenblatt (1990), así como la adaptación del algoritmo de eficiencia de trabajo desarrollado por los mismos autores, además se desarrolla un método alternativo con un algoritmo miope.

2. Descripción del Problema

Para el desarrollo de este trabajo, se partió de la situación actual sobre la cual opera una empresa de alimentos. En la cual, dentro del área de recolección, los productos están almacenados en cajas y aproximadamente el 95% de los productos son tomados por pieza y no por caja. El área de recolección cuenta con 1 estante dividido en 3 estaciones de trabajo iguales, las cuales cuentan con un sistema de gravedad para la toma de los productos. Cada estación cuenta con los mismos productos y se procura tener la misma cantidad en cada una de ellas. El área de recolección se ilustra en la Figura 1:

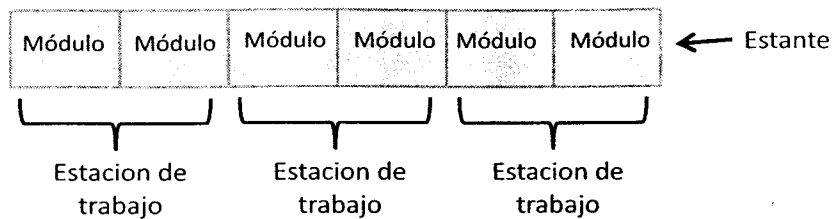


Figura 1. Área de recolección

Cada modulo tiene capacidad para 35 cajones frontales, cada uno con espacio para 7 cajas de profundidad. Una estación de trabajo está conformada por dos módulos por lo que tiene capacidad para 70 productos, tomando en consideración que no se puede asignar más de un producto por espacio frontal.

Al área de recolección llegan los productos 1 vez al día por la mañana antes de iniciar con la tarea de la recolección, con el pronóstico de requerimiento de cada producto y conforme se vaya requiriendo, se van realizando reabastos de los productos. Los productos son acomodados en el área delantera de acuerdo a la experiencia de los recolectores y al pronóstico de la demanda, sin embargo, no se cuenta con un método o proceso que asigne correctamente cuales y en qué cantidades se van a asignar los productos al área delantera.

Los métodos de asignación de SKUS que se encontraron ya publicados, no toman en cuenta restricciones de espacios enteros ni limitantes de capacidad para este tipo de situaciones, por lo que no pueden ser utilizados en almacenes cuando el espacio asignado no está basado en fracciones, sino en números enteros.

Así mismo, por tratarse de productos perecederos, es necesario contemplar que los productos no pueden ser almacenados por un largo periodo de tiempo, por lo que es necesario realizar por lo menos un reabasto al inicio del día para asegurarse que los productos que se almacenan para posteriormente ser entregados a los clientes, estén en buen estado para ser comprados por los consumidores finales.

3. Modelación del problema

3.1 Modelo propuesto por Bartholdi y Hackman

Para resolver el problema de cuales SKUS asignar al área delantera y en qué cantidades, se recurrió al modelo propuesto por Bartholdi y Hackman en el libro Warehouse & distribution science (2010), el cual está basado en el flujo por SKU, el cual esta expresado en volumen por año:

(1)

El modelo propuesto por Bartholdi y Hackman (1990) es el siguiente:

(2)

(3)

$$v_i > 0 \quad (4)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad (5)$$

Donde:

- c_1 : Costo de realizar un pick en el área frontal
- c_2 : Costo de realizar un pick en el área de reserva
- c_r : Costo de reabasto en el área frontal
- p_i : Recolecciones del SKU i
- f_i : Flujo del SKU i
- v_i : Volumen óptimo asignado al SKU i
- x_i : Variable binaria de decisión

En la función objetivo 2 se busca minimizar el costo total de las recolecciones.

En la restricción 3 se busca que el total de las fracciones de volumen asignadas v_i no exceda de 1, ya que el 1 representa el 100% del volumen disponible en el área delantera.

La restricción 4 dice que, si un producto va a tener una fracción del volumen en el área delantera, esta fracción tiene que ser mayor a cero, es decir, que efectivamente se le asigne una fracción del volumen disponible si va a ser colocado en el área delantera.

El volumen asignado a cada producto se basa en el flujo de cada SKU definido en la ecuación 1, por lo que a cada producto a almacenar en el área delantera se le asigna una fracción óptima de volumen:

$$v_i^* = \frac{\sqrt{f_i}}{\sum_j \sqrt{f_j}} \quad (6)$$

El numero de reabastos de cajas de acuerdo al volumen asignado en la ecuación 6 a cada producto, se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{f_i}{v_i} \quad (7)$$

3.2 Adaptación del modelo propuesto por Bartholdi y Hackman

Para el problema en análisis, no es posible asignar fracciones de volumen, sino es necesario que se asignen números enteros de cajones, así mismo, hay una capacidad limitada de productos a almacenar en el área delantera.

Para tal situación, se desarrolla la primera adaptación al modelo, donde para cada SKU a colocar en el área frontal se requiere por lo menos un cajón del número de cajones disponibles, Z. La segunda adaptación al modelo, se basa en datos diarios y no anuales, ya que al tratarse de productos perecederos, es necesario un reabasto diario para asegurar la calidad de los productos. Para la tercera adaptación al modelo, se propone un modelo basado en la demanda en cajas de cada producto, y no en su flujo, como en el modelo de Hackman y Rosenblatt (1990), ecuaciones 2 a 5.

La cuarta adaptación se realiza calculando el número de reabastos en cajas en unidades enteras necesarios por SKU, dado por la siguiente ecuación

$$r_i = \left\lceil \frac{d_i}{va_i} \right\rceil \quad \forall i \quad (8)$$

Donde:

r_i : Reabastos para el producto i
 d_i : Demanda en cajas del producto i
 x_i : Cajones asignados al producto i
 V : numero de cajas máximo de colocar por espacio frontal

El modelo adaptado es el siguiente:

$$\min \sum_{i=1}^n [(c_1 p_i + c_r r_i) x_i + c_2 p_i (1 - x_i)] \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i \leq Z \quad (10)$$

$$r_i a_i \geq \frac{d_i}{v_i} \quad \forall i \quad (11)$$

$$(r_i - 1) a_i \leq \frac{d_i}{v_i} \quad \forall i \quad (12)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (13)$$

$$a_i \text{ entero} \quad \forall i \quad (14)$$

$$a_i \geq 1 \quad \forall i \quad (15)$$

$$r_i \geq 0 \quad \forall i \quad (16)$$

Donde:

c_1 : Costo de realizar una recolección en el área delantera
 c_2 : Costo de realizar una recolección en el área de reserva
 c_r : Costo de reabasto en el área delantera
 p_i : Recolecciones del SKU i
 x_i : Variable binaria de decisión
 a_i : Numero de cajones en el área frontales asignados al SKU i
 r_i : Reabastos del SKU i
 d_i : Demanda en cajas del SKU i
 z : numero de cajones frontales disponibles
 V : Número máximo de cajas posibles a colocar por espacio frontal

La función objetivo 9 busca minimizar el costo total de recolección.

La ecuación numero 10, impone la restricción de que el numero de cajones totales asignados no exceda la capacidad total, definiendo que solo se pueden asignar hasta z número de espacios disponibles.

Las restricciones 11 y 12 son restricciones de ayuda que limitan que los reabastos por producto sean un número entero.

Así mismo se cuenta con la restricción 13 de la variable binaria de decisión, donde si el valor es 1, el producto se asigna al área delantera, 0 en caso contrario.

Las ecuaciones 14 y 15, definen que al ser asignado al menos un cajón al producto i , tiene que ser un número entero y la ecuación 16 que el número de reabastos tiene que ser un número positivo o cero.

El resultado del modelo es la selección de SKUS a colocar en el área delantera así como el número de cajones asignados a cada uno, al menor costo posible.

3.3 Modelo en ampl

Para resolver el modelo en un programa computacional, se recurrió al solver Cplex 11.1. Para permitir la solución del modelo con este programa computacional, fue necesario reformular el modelo para tener un problema con función objetivo y restricciones lineales, ya que el modelo original no pudo ser resuelto en el programa.

El modelo replanteado fue el siguiente:

$$\min CT = \sum_{i=1}^n r_i c_r + \sum_{i=1}^n \sum_1^j c_1 p_i x_{ij} + \sum_{i=1}^n p_i c_2 - \sum_{i=1}^n \sum_1^j c_2 p_i x_{ij} \quad (17)$$

$$r_i = \sum_1^j r_{ij} * x_{ij} \quad \forall i \quad (18)$$

$$\sum_1^j x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_1^j x_{ij} * v_{ij} \leq Z \quad (20)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \quad \forall j \quad (21)$$

$$r_i \geq 0 \quad \forall i \quad (22)$$

Donde:

c_1 : Costo de realizar una recolección en el área delantera

c_2 : Costo de realizar una recolección en el área de reserva

c_r : Costo de reabasto en el área frontal

p_i : Recolecciones del SKU i

x_{ij} : Variable binaria de decisión, donde si es asignado el valor de 1, el producto se incluye en el área delantera, y si se asigna 0, se incluye en el área de reserva.

r_i : Reabastos del SKU i

r_{ij} : Parámetro que indica los reabastos del SKU i con j cajones asignados

v_{ij} : Parámetro que indica el valor del número de cajones asignados

Z : numero de cajones disponibles en el área delantera

El modelo de solución tiene la estructura de un problema de asignación, donde la i representa el número de producto y la j el número de cajones asignados en el área delantera.

De tal manera que se tienen dos grupos de variables, la variable binaria de decisión x_{ij} así como los reabastos r_i .

El parámetro v_{ij} , es un parámetro de ayuda al solver que indica, que cuando se asignan j cajones al SKU i , los cajones van a tener el valor v_{ij} , es decir, si se asignan 2 cajones, el parámetro v_{ij} va a tener el valor de 2.

Para definir los valores del parámetro r_{ij} , se calcularon los reabastos del SKU i con j cajones, usando la ecuación 8 propuesta previamente.

La restricción numero 18 indica que, para cada SKU, el numero de reabastos va a depender de la variable binaria de decisión x_{ij} , en base al valor que tome esta variable, se va a definir qué valor tomar de la tabla de reabastos definida en el parámetro r_{ij} .

La número 19 restringe que a cada SKU i solo se le puede asignar un número de cajones j , mientras que la número 20 es la restricción de no exceder la capacidad del área delantera.

Las restricciones 21 y 22, son las que definen la variable binaria x_{ij} , así como que el número de reabastos es número positivo o cero.

4. Métodos de solución.

4.1 Algoritmo de eficiencia de trabajo propuesto por Bartholdi y Hackman

Bartholdi y Hackman (1990) proponen un algoritmo para seleccionar los productos que serán asignados en el área delantera.

Este algoritmo consiste en seleccionar los SKUS que tienen mayor ganancia por recurso consumido, que en este caso son horas de trabajo por unidad en el área delantera. Las ganancias para el producto i se expresan en la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{p_i}{\sqrt{f_i}}\right) \left(s \sum_{j \in S} \sqrt{f_j}\right) - c_r \left(\sum_{j \in S} \sqrt{f_j}\right)^2 \tag{23}$$

Donde:

S: Conjunto de SKUS a almacenarse en el área delantera

p_i : Recolecciones del producto i

f_i : Flujo del producto i

c_r : Costo de reabasto

Sin embargo como hasta este punto, todavía no se ha determinado el conjunto S a posicionar en el área delantera, se procede a acomodar los SKUS de acuerdo a su eficiencia de trabajo, ya que se sabe que acomodarlos de acuerdo a este término es equivalente a acomodarlos de acuerdo a su ganancia. La eficiencia de trabajo para el producto i se determina de la siguiente manera:

$$\frac{p_i}{\sqrt{f_i}} \tag{24}$$

Acomodando los productos de mayor a menor eficiencia, nos define que productos contribuyen más si son colocados en el área delantera. Basándose en este principio, se presenta un algoritmo que define que productos se colocan en el área delantera y en qué cantidades:

- Acomodar todos los SKUS de mayor a menor eficiencia de trabajo
- Evaluar el costo total neto de no colocar ningún producto en el área delantera, después colocando solo el primer producto de la lista, después los primeros dos, y así sucesivamente. Posteriormente se selecciona la estrategia con el menor costo total.

El volumen asignado por SKU en el área delantera así como sus reabastos, son calculados usando el modelo descrito anteriormente.

4.2 Adaptación del algoritmo de eficiencia de trabajo.

El modelo propuesto por Hackman y Rosenblatt (1990) está basado en el flujo de cada producto, ecuación 1, y como se menciona anteriormente, para el caso en análisis nos basaremos en la demanda en cajas de cada SKU, por lo que en la primera adaptación del algoritmo se realiza el siguiente cambio:

$$f_i = d_i \quad (25)$$

Definiendo entonces, en la segunda adaptación al algoritmo la eficiencia de trabajo de cada producto de la siguiente manera:

$$\frac{p_i}{\sqrt{d_i}} \quad (26)$$

La tercera adaptación que se realizó, fue transformar el volumen asignado y la cantidad de reabastos a números enteros. Para el volumen el criterio fue la parte decimal, si el valor asignado tenía una fracción decimal menor a .5, el redondeo fue hacia abajo:

$$\lfloor v_i \rfloor$$

Si la fracción decimal era mayor a .5 el redondeo fue hacia arriba:

$$\lceil v_i \rceil$$

La cuarta adaptación al algoritmo consistió en tomar el mismo criterio para los reabastos definido en la ecuación 8, basándonos en cajas en unidades enteras.

El algoritmo de solución fue el mismo:

- Acomodar todos los SKUS de mayor a menor eficiencia de trabajo
- Evaluar el costo total neto de no colocar ningún producto en el área delatara, después colocando solo el primer producto de la lista, después los primeros dos, y así sucesivamente. Posteriormente se selecciona la estrategia con el menor costo total.

Añadiendo la restricción del volumen disponible, realizando la quinta adaptación al algoritmo, donde el número de iteraciones está limitado a los Z cajones frontales disponibles, por ejemplo, si el número de cajones Z es igual a 50, no se pueden hacer más de 50 iteraciones, ya que al hacer la iteración 51 se estarían agregando 51 productos, los cuales estarían excediendo la capacidad del sistema.

4.3 Algoritmo miope

Para el desarrollo del algoritmo miope, se partió de una etapa inicial y una etapa de asignación, donde en cada una de ellas se iba asignando al área frontal el SKU que mayor ahorro tenía.

Para la primera etapa del algoritmo, el ahorro para cada SKU se definió de la siguiente manera:

$$a1_i = p_2 * p_1 - p_1 * p_i - c_r * r_i \quad (27)$$

Donde los reabastos están basados en la asignación de un solo cajón frontal a cada SKU.

El primer SKU a ingresar al área delantera será aquel que mayor ahorro tenga, teniendo como restricción que solo se puede ingresar por primera vez con un solo cajón, y posteriormente se pueden ir añadiendo más cajones asignados, uno por uno, si el ahorro sigue siendo mayor que el resto de los SKUS. El ahorro de ingresar un cajón más de un SKU ya asignado, está definido como se muestra a continuación:

$$a2_i = (p_2 * p_i - p_1 * p_i - c_r * r_i) - a1_i \quad (28)$$

Mismo criterio se sigue para ir añadiendo cajones sucesivos. El proceso acaba cuando ya se han asignado todos los cajones disponibles en el área delantera, por lo que los que no fueran asignados, irán al área de reserva. El costo total de la solución se puede calcular de la misma manera hecha anteriormente:

$$CT = \sum_{i=1}^n [(c_1 p_i + c_r r_i) x_i + c_2 p_i (1 - x_i)] \quad (29)$$

4.4 Solver Cplex

Para resolver el modelo adaptado, ecuaciones 9 a 16, con un programa computacional, se recurrió al Solver Cplex, el cual logro resolver las diferentes instancias en tiempos muy cortos, que no excedían de los 10 segundos.

Con el lenguaje de modelación AMPL, Cplex no logro reconocer el modelo original cuadrático, por lo que fue necesaria la reformulación descrita en el capítulo 4, en las ecuaciones 17 a 22, en el lenguaje de programación AMPL, por lo que la variable binaria de decisión era 1 cuando se asignaba un SKU con N numero de cajones.

5. Experimentación computacional

5.1 Definición de instancias

Para fines de conocer la eficiencia del modelo formulado, ecuaciones 9 a 16, se generaron instancias basadas en parámetros y rangos propuestos, los cuales se muestran en la Tabla 1:

PARAMETROS		RANGOS				
		1	2	3	4	
1	SKUS	50	100	150		
2	DEMANDA	CHICA (Original)	MEDIANA (Doble)	GRANDE (Triple)	-	
3	PIEZAS/PICK	ORIGINAL	DOBLE		-	
4	% DISPONIBLE	50%	90%	-	-	
5	COSTOS	C1	2	2	2	2
		C2	3	4	3	4
		CR	10	10	15	15

Tabla 1. Parámetros y rangos para la generación de instancias

Estas variantes fueron definidas con la finalidad de tener datos con las variaciones más importantes que se pueden tener y realizar una comparación con el resultado obtenido a través del modelo.

Los datos iniciales sobre los cuales se baso para la generación de instancias en los parámetros de demanda y recolecciones, fueron los proporcionados por la empresa de alimentos, sobre los datos reales en un mes de operación del almacén.

Para la etapa de experimentación se elaboraron 6 instancias, dos para cada tamaño del experimento definido en el parámetro 1. Las cuales fueron adaptadas en base a los parámetros 2, 3, 4 y 5, teniendo un experimento con 288 instancias.

5.2 Resultados computacionales

Para obtener resultados sobre los dos métodos propuestos, se recurrió al uso de Excel, mientras que la adaptación del modelo propuesto fue resuelta utilizando el solver Cplex.

Una comparación de los resultados obtenidos en las 288 instancias se muestra en la Tabla 2:

		50 SKUS	100 SKUS	150SKUS	DIFERENCIA POR METODO DE SOLUCION
Algoritmo de eficiencia de trabajo		0.43%	0.45%	0.31%	0.40%
Algoritmo Miope		0.68%	2.46%	1.45%	1.53%

Tabla 2. Comparación de resultados obtenidos con los métodos de solución y CPLEX

Tomando como el resultado óptimo el obtenido con el solver Cplex, se puede observar que los dos métodos propuestos obtienen soluciones muy cerca del óptimo. El algoritmo de solución de eficiencia de trabajo se encuentra en promedio solo un .40% arriba del optimo, mientras que el algoritmo miope en un 1.53%.

En la Tabla 3 se puede observar el número de instancias en las que el algoritmo de eficiencia de trabajo obtuvo mejores resultados que el miope, y en la Tabla 4 se muestran el número de instancias donde los dos algoritmos obtuvieron el mismo resultado, mostrando que tienen a funcionar de manera similar en instancias pequeñas solamente.

50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS	TOTAL
53.13%	79.17%	35.42%	55.90%

Tabla 3. Instancias en las que el algoritmo de eficiencia de trabajo fue mejor que el miope

50 SKUS	100 SKUS	150 SKUS	TOTAL
11.46%	0.00%	0.00%	3.82%

Tabla 4. Instancias en que los dos métodos de solución obtuvieron el mismo resultado

La comparación realizada entre los dos métodos propuestos, muestra que el que obtiene mejores resultados de los dos es el algoritmo basado en la eficiencia de trabajo. Asimismo, se puede observar que los dos métodos de solución obtienen mejores resultados cuando se trabaja con instancias pequeñas.

6. Conclusiones y recomendaciones de futuras investigaciones

6.1 Conclusiones

En la actualidad se pueden observar muchos tipos de almacenes y políticas de almacenaje, por lo que no siempre lo que aplica a uno puede ser utilizado por otro, sin embargo con esta investigación se puede concluir que es posible utilizar las investigaciones previamente documentadas mediante la adaptación de los modelos y métodos de solución, como se mostro en esta investigación.

Así mismo, no se necesita siempre de programas computacionales muy avanzados o difíciles de conseguir y dominar para su resolución, ya que mediante el uso de algoritmos, como el algoritmo miope propuesto, es posible utilizar las herramientas con las que diariamente se trabaja para lograr obtener resultados que contribuyan a una disminución de los costos operativos y administrativos.

Se puede concluir con los experimentos computacionales que los modelos y métodos de solución propuestos arrojan resultados buenos y muy cercanos al óptimo, por lo que pueden resultar de gran utilidad en las empresas que almacenen productos perecederos o que manejan un tipo similar de almacén al problema descrito.

El modelo y los métodos de solución propuestos, pueden ser aplicados en cualquier tipo de almacén manual donde se manejen unidades de espacio enteras y con capacidad limitada, sin importar el tipo de producto que se maneje, siempre y cuando el volumen por producto o por medio de almacenamiento (cajas, tarimas, etc.) sea el mismo para cada SKU. Así mismo, el modelo puede ser utilizado para cualquier tamaño de demanda y variedad de productos con los que se cuentan, tendiendo a obtener mejores resultados en situaciones donde se cuentan con aproximadamente 50 tipos de productos.

Si la demanda que se maneja de los productos tiende a ser muy alta, se recomienda utilizar el algoritmo de eficiencia de trabajo, y si la demanda es media o baja, se puede utilizar tanto el algoritmo de eficiencia de trabajo como el algoritmo miope.

6.2 Futuras investigaciones

Sobre el trabajo realizado en esta investigación, se hacen las siguientes recomendaciones sobre investigación futuras que pueden ayudar a generar mejores resultados adaptando el modelo a otros tipos de almacenes y operaciones:

- Adaptación del modelo a almacenes donde no son necesarios reabastos diarios, ya que en el modelo propuesto se toma de base que se hace un reabasto al día, mientras que existen otras situaciones donde los reabastos se van realizando de acuerdo a la demanda y al periodo de tiempo que se maneje, puede realizarse en base a demanda semanal, mensual o anual.
- Adaptación del modelo cuando los productos que se almacén tienen diferentes volúmenes, por lo que un solo producto puede ocupar mas unidades de espacio que otro. Para esta situación se podría agregar una restricción que indique los espacios mínimos requeridos por producto si son colocados en el área delantera.
- Para utilizar este modelo en productos perecederos donde no se realiza un reabasto general diario, se puede añadir una restricción que indique el tiempo máximo que un producto puede permanecer en el almacén, en base a su fecha de elaboración y caducidad, de tal manera que el modelo genere una solución donde los productos siempre están en buenas condiciones y pueden ser entregados a los clientes.

Referencias Bibliográficas

- Bartholdi, J.J., Hackman, S.T., 2005. *Warehouse & distribution science*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga.
- Coyle, J.J., Bardi, E.J. and Langley, C.J. (2003). *The Management of Business Logistics: A supply Chain Perspective*, South-Western, Mason, OH.
- E.H. Frazelle, S.T. Hackman, U. Passy, L.K. Platzman (1994). The forward-reserve problem, in: T.A. Ciriani, R.C. Leachman (Ed.), *Optimization in Industry 2*, 43-61.
- Frazelle. E. (2002). *World-class Warehousing and Material Handling*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Heragu, S. S., Huang, C. S., Mantel, R. J. Schuur, P. B. (2003). A mathematical model for warehouse design and product allocation, *International Journal of Production Research*, 43 (2), 327-338.
- J.P. van den Berg, G.P. Sharp (1998). Forward-reserve allocation in a warehouse, *European Journal of Operations Research*, 111 (1), 98-113.
- ST. Hackman, M.J. Rosenblatt (1990). Allocating items to an automated storage and retrieval system, *IIE Transactions* 22 (1), 7-14.
- Tim D Nguyen, John S Usher, Gail W DePuy (2005). The Forward-Reserve Problem with Seasonal Demand, *IIE Annual Conference*. Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Frazelle, E.H., Tanchoco, J.M.A. (2003). *Facilities Planning*. John Wiley & Sons, NJ.

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey



30002007422520

<http://biblioteca.mty.itesm.mx>