

Desarrollo de un modelo heurístico para la optimización en el manejo de material en estibas en una bodega

Laura Manotas Romero

Ingeniería Industrial,
Universidad del Norte, Barranquilla
Investigador Jr. FCIMEC, Fundación Centro de Investigación en
Modelación Empresarial del Caribe
Barranquilla, Colombia
lmanotas@fcimec.org

Diana Ramírez Ríos

MSc en Ingeniería Industrial
Universidad del Norte, Barranquilla
Directora Científica FCIMEC, Fundación Centro de Investigación
en Modelación Empresarial del Caribe
Barranquilla, Colombia
dramirez@fcimec.org

Resumen— Los problemas enfocados en las bodegas siempre se han caracterizado porque dependen del tipo de negocio que fue analizado. Algunas empresas tienen zonas de cuarentena en sus bodegas y otras no. Algunas tienen out-and-back picking, y otras hacen picking en un solo recorrido para diferentes ítems. Algunas industrias tienen zonas de adelante, otras poseen zonas de almacenamiento a granel, zonas de producto retenido y de producto rechazado. En general, la optimización de las bodegas es realizada según todas las características mencionadas. En la presente investigación se desarrolló una heurística que fue adaptada con los supuestos y criterios de la regla del cube-per-order para la optimización de asignación de espacios unida con algunas de las bases para la optimización de picking, en el que la distancia de la ruta es importante pero no la ruta en sí. La aplicación fue realizada sobre un ejemplo de bodega, con base a la información suministrada por una empresa del sector industrial, en donde el aspecto crítico detectado consistía en conocer la posición óptima de las diferentes áreas y de los productos en las estanterías disponibles en la bodega. Todo esto, de acuerdo con las capacidades de las estanterías y las características de los diferentes tipos de productos que se van a almacenar. El objetivo que se persigue es el de minimizar la distancia total recorrida en un periodo de tiempo evaluado, sujeto a restricciones de espacio y asignación. Se mostrará entonces la mejoría significativa en la eficiencia de una bodega de material en estibas dada la aplicación de la heurística desarrollada.

Palabras clave— Bodegas, optimización en asignación de espacios y en picking, regla del índice cube-per-order.

Abstract— Warehousing problems have always been characterized depending on the type of businesses that is analyzed. Some businesses have quarantine zones in their warehouses, other don't have. Some have out-and-back picking, others do picking for different items at the same time. Some industries have forward areas, bulk storage areas, retained products areas and rejected products areas. In general, the optimization of warehouses is done depending on all of the characteristics mentioned above. In this research paper, a heuristic has been

adapted from the cube-per-order index rule for slotting optimization merged with some of the picking optimization techniques, where the route distance is important but not the route itself. The application was made to over an warehouse, based on the information provided by a industrial company, where the critical aspect was to know the optimal position of the different areas and the products in the racks that the warehouse have, taking into account the capacities of the racks and the characteristics that certain type of products have. The objective was to minimize the total distance travelled in a specific period of time, taking into account capacity and assignment restrictions. It will be shown the significant improvement in the efficiency of a warehouse of material in pallet, given the application of heuristics developed.

Keywords— Warehousing, slotting and picking optimization, cube-per-order index rule.

I. INTRODUCCIÓN

En las empresas modernas de hoy en día, dedicadas al control de bodegas y manejo de inventarios, se puede visualizar como su negocio gira en torno a mantener los tiempos de ciclo de cada orden mucho más cortos y lograr el despacho oportuno del producto al cliente. Así mismo, toda empresa desea aumentar sus utilidades y una de las maneras en que puede hacerlo es por medio de la reducción de los costos asociados a estos procesos. En una bodega, para poder reducir los costos es necesario observarlo desde dos puntos de vista, el de optimizar el proceso de Picking y el optimizar las actividades de recibo de las órdenes.

Sin embargo, de acuerdo con los estimados de la industria, el proceso de Picking representa más del 60% de los costos de operación de una bodega [1] y algunos autores hablan de un 55% [2].

Con estas estadísticas se afirma, a nivel general, que este es uno de los procesos más laboriosos y costosos que existe en cualquier bodega. Así que optimizar las operaciones de Picking le garantiza una mayor rentabilidad a la bodega, dado que se ahorrarán la mayoría de sus costos de operación.

Para optimizar el proceso de Picking, algunos autores se enfocan en encontrar la mínima distancia entre las rutas que tienen que hacer los montacargas al recoger la mercancía de los estantes y llevarla al punto de despacho, tomando como base el Problema del Agente Viajero [3]. Otros autores van más allá y se preocupan, primero, por optimizar el diseño de la bodega y luego por minimizar las distancias asociadas a las rutas de la operación de Picking [4]. Para todos los diferentes casos, es necesario tener en cuenta que para cada tipo de negocio hay un manejo distinto. Sin embargo, en este estudio se presentan los distintos casos implementados, con el fin de analizar la optimización que se hará en una bodega de material almacenado en estibas con base en información suministrada por una empresa del sector industrial, con el fin de lograr una mayor productividad.

II. ESTADO DEL ARTE

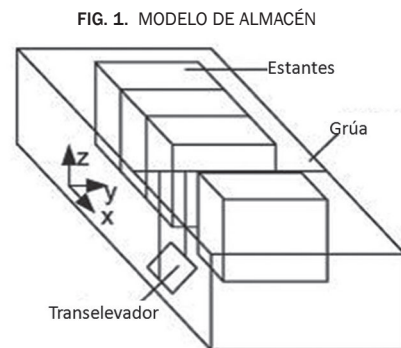
A. Optimización en Picking (Picking optimization)

La automatización de las bodegas y los sistemas de recibimiento de mercancía ha creado la necesidad de crear algoritmos computarizados para soportar las decisiones de programación de *Picking* y de vehículos en los muelles de recepción y distribución de mercancía en las bodegas. Estos algoritmos deben minimizar las distancias recorridas por las grúas al momento de recoger los productos en el *Picking*.

Los objetivos hoy día de los problemas de *Order Picking* están enfocados a eliminar la intervención humana en los procesos de recolección de productos en las estanterías. Existen 3 problemas de interés en este ámbito: 1) Asignación de recursos, 2) Generación de un *Order Picking* para cada grúa o vehículo interno dentro del almacén, y 3) Planeación del reabastecimiento de las áreas de reserva a las áreas de *Picking*.

Un problema de *Order Picking* se reduce a trabajar un problema de TSP (Problema del Agente

Viajero), y en el pasado se utilizaban algoritmos genéticos, colonias de hormiga, simulado, entre otras meta heurísticas para resolver este problema. Estas entregaban buenos resultados, pero no eran fácilmente aplicables en la práctica. En [5] se desarrolló un modelo de optimización que se resuelve con un modelo recursivo de programación de la producción y de almacenamiento de acuerdo al control de sistemas. El problema estudiado en este artículo es la secuencia y toma de decisiones en *Picking* según un sistema multipasillo y una ubicación compleja de los ítems a recoger. A continuación se presenta la Fig. 1 en donde se muestra el modelo de almacén con el que se trabajó en esta investigación:



Fuente: (SHUHUA & YANZHU, 2009) Pág. 990

El modelo desarrollado consiste en el siguiente procedimiento:

- Obtener todas las tareas del día respectivo mediante el sistema de información de almacenamiento (Warehouse management system).
- Detallar todas las tareas a realizar. Esto es ubicar espacialmente todos los puntos a los cuales debe visitar la grúa de recolección de productos.
- Ejecutar el algoritmo para solucionar el problema del agente viajero o TSP.
- Analizar los resultados del algoritmo.
- Seleccionar la grúa para realizar el recorrido.
- Después que realiza el recorrido de la ruta, la grúa vuelve a su posición inicial.
- Para este modelo, las condiciones básicas del almacén eran:
- Consiste en tres canales, 4 estantes y una grúa que puede operar por los lados de cada canal.

- Los estantes son rectangulares. Las grúas se pueden mover en sentido horizontal y vertical al mismo tiempo. Las coordenadas de los estantes toman como punto cero la esquina inferior izquierda.
- Existen una variedad de ítems en el sistema.
- La demanda es fija y conocida, y no está relacionada a los otros ítems.
- La aceleración y desaceleración de las grúas es lineal.

Básicamente el algoritmo se basa en escoger puntos aleatorios y calcular su distancia. Inmediatamente esto lo compara con los recorridos que ya se han generados, y si es mejor actualiza el sistema. Es importante destacar que el algoritmo es eficiente porque no guarda todas las respuestas sino solamente las que son mejores que las anteriores.

El algoritmo desarrollado en [6] utiliza el algoritmo de Colonia de Hormigas como la metodología para encontrar una solución óptima al problema de minimizar la ruta en un proceso de *Picking*. En su trabajo analizan las características de trabajo para estanterías de almacenamiento fijas en una bodega automatizada. Principalmente se busca optimizar las estrategias de *Picking* para poder mejorar el rendimiento (*throughput*) de la bodega. Teniendo todo esto en cuenta y de acuerdo a los requerimientos de las operaciones de *Picking* en una bodega con una sola hilera, se construye un modelo matemático con múltiples restricciones que buscan minimizar el tiempo de viaje en ruta. Se hicieron simulaciones computacionales para validar el modelo propuesto y los resultados demuestran superioridad en cuanto a su capacidad de búsqueda y rapidez en la entrega de resultados, que satisface la demanda de trabajo de media y alta escala.

Otro algoritmo, conocido como *Pick-Path Optimization* en [3] utiliza la heurística para resolver el problema TSP, pero hace una versión más sencilla de la misma, ya que le agrega algunas restricciones que limita el número de posibles soluciones. El limitante de este algoritmo es que no garantiza encontrar la solución óptima que se daría por la heurística original, sin embargo, la solución es mucho más práctica porque se adapta a las reglas y configuración de las bodegas, en general. El objetivo que se debe minimizar es la distancia total recorrida y para ello, se hace una configuración de

la bodega como una red de posiciones de almacenamiento. El algoritmo es programado en Java y el programa permite:

- Describir el mapa de la bodega (en una hoja de Excel)
- Entregar una lista de localizaciones de almacenamiento a ser visitados
- Especificar el tipo de viajes permitidos para la bodega (restricciones)
- Especificar los grupos de direcciones que se pueden visitar en la operación de *Picking*.

B. Optimización en asignación de espacios (*slotting optimization*)

En [7] se presenta un problema interesante que es el proceso de selección de los productos en las áreas de *Picking*, con mínimas distancias. J. L Heskett propuso un algoritmo heurístico llamado Cube-per-order (CPO), que presenta una solución a la localización de ítems en la bodega con el fin de minimizar los costos involucrados en el tiempo de espera para la selección de los productos de una orden recibida.

CPO es un criterio para la colocación de stock en un almacén de distribución a fin de minimizar el costo de la mano de obra asociados con montaje de elementos del stock en la bodega para satisfacer los pedidos de los clientes.

Conceptualmente hablando, el tipo de distribución de la bodega en discusión es el presentado a continuación en la Fig. 2. La bodega está dividida en la zona de reserva. Estos almacenes guardan una variedad de ítems, y los clientes pueden realizar una orden con cualquier combinación de productos.

FIG. 2. ZONAS DE LA BODEGA



Fuente: (KALLINA & LYNN, 1976)

Cuando una orden de un ítem es recibida, un operador con un montacargas va desde el almacén en donde se encuentra el artículo y regresa al área de despacho de pedidos. Este proceso es llamado “recoger una orden”.

Dependiendo del diseño del almacén, la carga del ítem y la distribución normal de los productos con respecto a una orden, se pueden emplear una serie de formas o disciplinas para recoger los productos en una bodega. Para el uso de la regla en cuestión se tendrán en cuenta las dos siguientes disciplinas básicas: primero, la selección de cada ítem ida y vuelta (out-and-back), usada donde las órdenes de productos que se van a recoger son en grandes cantidades, o donde todo el trabajo es sacado con un montacargas cuya capacidad de carga es de un solo ítem por viaje para llevarlo a la zona de despacho; y segundo, *Picking routing* (ruteo), en este caso varios ítems de una orden son recogidos en un solo viaje de la bodega hasta que el medio de transportación tenga la capacidad completa.

La clave del costo variable en el proceso de recolección de una orden es el tiempo en el que incurre el operador del montacargas en sus recogidas. Se asume que con cualquiera de las dos disciplinas expuestas, la velocidad promedio de este vehículo es igual para todas las órdenes. Asimismo, se asume que los ítems que se van a recoger tienen un volumen, peso y configuración geométrica lo suficientemente parecida que estos factores no afectan el tiempo que se requiere para levantar el ítem. De lo anterior se deduce, por tanto, que en la disciplina out-and-back el costo de recoger un ítem dado es directamente proporcional a la distancia desde el área de despacho donde está la orden a la ubicación del ítem en la bodega. En el caso de la disciplina *Picker routing*, el tiempo total del operario en un viaje se puede distribuir a través de todos los elementos recogidos, entonces el tiempo dado a cada elemento de la orden será proporcional a la distancia de este con el área de despacho del pedido. Estos tiempos pueden ser promediados a través de todos los viajes realizados por el operador durante un periodo de tiempo para llegar a un costo promedio de recogida del producto. Una vez más, se deduce que el costo promedio de un ítem es proporcional a la distancia entre el área de despacho del pedido y la ubicación del ítem en la bodega.

Así, con el fin de analizar los costos variables para recoger basta con concentrarse en la configuración geométrica del área de la bodega. En la Figura 2 se divide el área de la bodega en zonas. En la práctica, estas zonas se ajustan a las características físicas (pasillos y bahías) de la bodega real. En promedio, la distancia desde la zona de despacho de la orden hasta un lugar cualquiera en la Zona 2 es el doble que la distancia a un lugar cualquiera en la Zona 1, y así.

Otro aspecto importante de este tipo de problemas que no ha sido mencionado hasta el momento es la posibilidad de tener pronósticos de la demanda para cada ítem en la bodega. Además, incluso asumida esta demanda es bien sabido con certeza, que si la demanda tiene un comportamiento claramente estacional entonces un factor adicional para considerar es el apropiado horizonte de tiempo sobre el cual se debe encontrar la solución del costo mínimo.

Regla del índice Cube-Per-Order CPO

A razón de enfocarse en la reducción del costo de recoger una orden, se deben hacer las siguientes suposiciones:

- Se ha determinado un horizonte de tiempo sobre el cual se desea minimizar el costo de recoger una orden.
- Sobre este horizonte de tiempo, la demanda del cliente para cada ítem de la bodega es conocido con certeza, tanto la cantidad que debe ser despachada como el número de órdenes que van a ser recibidas.
- Se ha determinado la demanda diaria máxima del inventario que se debe mantener en la bodega para cada ítem, y adecuar el espacio total de la bodega para que se ajuste a esta cantidad específica (la demanda diaria determinada puede ser diferente para diferentes ítems).

Con estas suposiciones, el problema es ubicar los ítems en la bodega para así minimizar el costo variable de recoger una orden; de igual manera se minimiza la distancia total de los recorridos del montacargas durante el horizonte de tiempo seleccionado.

Estos son en general cuatro factores determinantes del costo: compatibilidad, complementariedad, popularidad y espacio. Los ítems compatibles son aquellos que pueden ser almacenados

uno al lado del otro sin temor a alguna contaminación o daño, así entonces los ítems incompatibles, como por ejemplo, un caso muy común sería la comida y gasolina, deben ser almacenados en lugares no adyacentes. Los ítems complementarios son aquellos que frecuentemente son demandados simultáneamente por el cliente en la misma orden, como sería el caso en los supermercados del espagueti y salsa de tomate, y estos deben estar ubicados cerca uno del otro. Los ítems populares, en términos del promedio de recogidas por día, deben estar localizados cerca del área de despacho, ya que estos ítems tienen el mayor número de viajes hacia su ubicación. Este criterio parece ser el más recomendado para la ubicación de stock. Finalmente, es recomendable que los ítems que requieren el menor espacio en la bodega estén ubicados más cerca del área de despacho.

Claramente, estos cuatro criterios, en general, no pueden ser introducidos simultáneamente, y es necesario mucho esfuerzo. Primero, se asume que todos los ítems de la bodega son compatibles. Luego, se asume que hay grupos de ítems de alta complementariedad que se combinan en clases para formar nuevos "ítems" en el listado maestro de la bodega. Estos nuevos ítems pueden o no reemplazar totalmente los ítems individuales para convertirse en clases, según el grado de complementariedad. Con esto, se puede especificar los pasos que involucran la implementación de la regla del índice CPO, que establece un intercambio cuantitativo entre los dos objetivos de ubicar los ítems que ocupan menos espacio cerca de la zona de despacho, y también los ítems que son más populares.

Los siguientes pasos involucran nada más que una secuencia de tabulación de datos y cálculos aritméticos simples.

- 1) *Preparar un diagrama a escala de toda la bodega, según la ubicación de los pasillos, áreas de almacenamiento y otras características físicas significativas que afecten los movimientos de los montacargas, como los obstáculos, paredes interiores y demás. Se indicará la capacidad de cada zona de almacenamiento entre pasillos, expresada en pies cúbicos, metros cúbicos o número de paletas, según sea más conveniente.*
- 2) *Dividir el área de la bodega conceptualmente en zonas que representan distintas distancias promedio hacia la zona de despacho, y tenga en cuenta las zonas en el diagrama a escala. Además, la capacidad de cada zona debe ser tabulada.*
- 3) *Hacer un listado de todos los ítems que son llevados a esa bodega. En la columna siguiente, registrar el volumen requerido para almacenar la unidad más pequeña que se pueda embalar de cada ítem de una orden que un cliente pueda pedir.*
- 4) *Para cada ítem, registrar el pronóstico del número esperado de órdenes a ser recibidas en un horizonte de tiempo, y el número de unidades esperadas para despachar. Se asume que cada orden para un ítem representa una recogida (si se espera que ocurra frecuentemente que se deba ir a recoger más de una vez en una orden, entonces se reemplaza la orden estimada del ítem por una estimación del número total de recogidas).*
- 5) *Calcular y registrar por separado para cada ítem el número promedio de unidades por pedido, el número promedio de volumen de almacenamiento requerido por cada pedido y el número promedio de órdenes que se reciben en un día de envíos durante el horizonte de tiempo. Los dos últimos números se multiplican con el número de días establecido como el objetivo máximo de días de demanda para obtener la cantidad de espacio del área de la bodega a ser apartadas para cada ítem. El índice CPO es la relación de este último número y el promedio de pedidos por día de envío. (Esta definición del índice indica una compensación de lo cuantitativo e intuitivo entre espacio y popularidad. Más directamente, el índice se define como el producto de la meta de días de demanda y el espacio de almacenamiento promedio por pedido).*
- 6) *Todos los ítems están ahora ordenados según su índice CPO, el ítem con el menor índice comienza de primero. De este ranking, depende el diseño del área de la bodega. Los ítems con menor índice son colocados en la zona 1 y así sucesivamente cada vez más lejos de la zona de despacho.*

La regla CPO es fácil de implementar, tanto en términos de tiempo y el nivel de mano de obra requerida. También tiene una gran flexibilidad a condiciones cambiantes. Una observación empírica hecha es que la regla CPO, con frecuencia, es que el rendimiento de la bodega es muy diferente de los obtenidos por la aplicación del criterio de la popularidad o el espacio. Además, se puede esperar que el diseño de la bodega de la regla difiera en cierta medida del diseño real en existencia. En determinadas situaciones la aplicabilidad del índice de CPO puede ser reforzada por cambios específicos en la configuración del área de la bodega.

C. Optimización de diseño en planta (layout optimization)

Para el diseño del *Order Picking Area*, se tienen otros algoritmos que trabajan el esquema completo del diseño de la bodega, según la información del espacio disponible y definición de las áreas de operación y las estanterías con las que se cuentan para la bodega:

En [8] se estudiaron las interacciones entre las políticas de ruteo y el diseño del área de Picking por medio de simulación. Sin embargo, no desarrolló una metodología de diseño. En su estudio, encontró que la influencia de la posición de depósito en distancias de ruta es menor al 6% y si hay más de 15 picks por ruta, ésta cae por debajo del 1%.

En [9] se estudió el impacto del diseño del área de *Picking* por medio de los estimados en la distancia de ruta en diseño de un solo bloque.

En [10] se desarrolló un modelo capaz de encontrar la mejor estructura de diseño para el área de *Picking*, por medio de la formulación de un modelo matemático no lineal, basándose en las características de dos políticas distintas de operación. Sus resultados les llevaron a concluir que el número de hileras óptimas depende fuertemente de la capacidad del área de almacenamiento y de la lista de *Picking*. Aun cuando fue una contribución importante, su modelo se limita a diseños de un solo bloque.

En el [11] se presentó un modelo analítico para el diseño en planta del área de *Picking* en sistemas de *picker-to-part* de nivel bajo mediante el índice *cube-per-order* (COI), explicado en la pasada sección, basándose en reglas de asignación aleatoria de espacios. Los autores presentan una

fórmula que relaciona el número óptimo de hileras con los parámetros principales que afectan el diseño de planta, los cuales son: la longitud de las hileras de *Picking*, el número de paradas de *Picking* por viaje y la forma del diagrama de Pareto basado en el COI. También tienen en cuenta el incremento en el valor esperado de distancias de viaje que surge de la adopción de un número no óptimo de hileras.

En [12] estudiaron bodegas que consisten en dos bloques con el depósito localizado entre ambos bloques en la cabecera de la hilera cruzada media. El modelo que presentan se basa en la asignación óptima del espacio de almacenamiento, mediante la estrategia ABC y en la minimización del tiempo promedio de ruta de *Picking*, en el que al mismo tiempo se mantenga cierto nivel de espacio de almacenamiento. En su estudio consideran dos tipos de diseño, uno que tiene el espacio disponible fijo y el otro que no lo tiene fijo. Para cada situación presentan una formulación matemática y heurística para resolverla.

En [4] se estudian modelos de múltiples hileras y número de bloques. Los autores presentan un método revertido para optimizar el diseño del área de *Picking* e introducen un estimado estadístico para la distancia total promedio con el fin de poder minimizarla. Presentan un modelo analítico y lo validan por medio de simulación. En este modelo, ellos consideran la operación de *Picking* manual, en el que los operadores recorren la bodega y recogen los ítems y los llevan a su ruta. La estructura del área está compuesta por hileras de *Picking* que tienen estanterías en ambos lados y en donde los operadores tienen la posibilidad de recoger material de ambos lados. En este modelo existen por lo menos dos hileras cruzadas (una en el frente y otra en la parte de atrás) y en esas hileras no se tienen puntos de *Picking*.

III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para este modelo se tienen en cuenta que la política de asignación de espacios es aleatoria siguiendo una distribución uniforme y se tienen en reglas de asignación de rutas que limitan el espacio de soluciones. Para lo anterior, se asume que los operadores recorren las hileras por toda la

mitad de la hilera, evitando congestión de operadores y también recogen los productos sin tener que utilizar un mecanismo de levantamiento de carga.

Se debe analizar de qué manera están organizados los productos, en este caso se tomará que las estanterías de la bodega están organizadas por familias de producto, los cuales se encuentran paletizados (en estibas). Por otro lado, se debe evaluar si los espacios están organizados de acuerdo a la cantidad de producto en rotación, es decir, si se tiene en cuenta su popularidad; esto, versus el volumen que se puede manejar por estiba, por lo que se debe revisar la asignación óptima de los espacios en bodega, basados en la popularidad y el volumen que el producto maneja.

Como ya se mencionó anteriormente, se tomará el caso de una bodega en la que los estantes están sectorizados por tipo de producto y también por estado, que puede ser: Cuarentena, Aprobado, Rechazado, Retenido, en Alistamiento. El estado de Cuarentena es establecido cuando el producto no ha sido inspeccionado previamente, por lo que se le realizan pruebas para poder ubicarlo en las estanterías y así evitar la contaminación del resto de los materiales de la bodega; una vez el material pasa satisfactoriamente las pruebas de control de calidad, se le coloca el sello de Aprobado y es trasladado a la estantería correspondiente; si el producto no pasa las pruebas de control de calidad, entonces será ubicado en la zona de producto Rechazado o Retenido según sea el caso; a la zona de Alistamiento, solo pasan los productos por requerimiento del área de producción y que estén en la zona de Aprobado. La cantidad de zonas asignadas en la bodega, depende indispensablemente de las necesidades de la empresa. Para el caso en estudio se tendrán en cuenta las cuatro zonas anteriormente mencionadas, y una quinta zona que se tomará como área de Alistamiento, en donde se ubicarán las estibas según los pedidos requeridos y donde solo pasará material que ha estado en el área de Aprobado, para luego salir de la bodega hacia Producción, como se mencionó anteriormente. Cabe destacar que las zonas deben estar claramente señalizadas, y para el caso de que se maneje material con rigurosos controles de calidad, por el tipo de producto, se

debe además ubicar la estiba en la zona correspondiente según los resultados de las pruebas de muestreo, se debe colocar una etiqueta o señalización distintiva de que el producto fue asignado para x área, esto es de vital importancia para el personal que maneja la bodega.

Para el caso de este tipo de bodegas y dadas todas las condiciones anteriormente establecidas, el método más adecuado a partir del cual se puede empezar desarrollar para organizar los productos de la bodega de la mejor manera es la regla *Cube-Per-Order*. Se debe tener en cuenta que este método no se ajusta de manera exacta, por lo que hay que tener en cuenta ciertas variaciones para que su aplicabilidad sea viable, por ello, se ha combinado para lograr una optimización en el *Picking*, para el cual se tienen en cuenta las distancias, principalmente. La optimización del diseño de la bodega se tiene como referencia, sin embargo, no se tuvo en cuenta por el mismo hecho de que normalmente las bodegas ya tienen fija sus estanterías, la cantidad de hileras, y demás.

El modelo que se ha desarrollado debe indicar la posición óptima de las zonas en las estanterías para que se reduzca el tiempo de *Picking*. Este modelo se aplica a empresas que tienen un *Picking out-and-back*, lo que significa que no se necesita la ruta óptima de recogida de los pedidos sino más bien un arreglo óptimo de estanterías asignadas a cada tipo de producto con el fin de minimizar la distancia de los recorridos, según las capacidades en las estanterías, de acuerdo con el siguiente modelo matemático.

IV. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si producto } i \text{ se ubica en el estante } j \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$x_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{si área de estado } k \text{ se ubica en estante } j \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

A. Variables:

B. Parámetros:

u_{it} = Cantidad de estibas del producto i que ingresan a bodega en el periodo t .

cap_j = Capacidad de la estantería j .

z_{it} = Cantidad de estibas del producto i que salen de la bodega en el periodo t .

de_j = Distancia desde la entrada a la estantería j .

d_{jl} = Distancia desde la estantería j a la estantería l .

da_j = Distancia de zona de alistamiento ubicada en la estantería j a la salida.

$q_i = \begin{cases} 1, & \text{si producto } i \text{ ingresa a cuarentena} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$

$e_i = \begin{cases} 1, & \text{si producto } i \text{ no ingresa a cuarentena} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$

p_{ik} = Proporción del producto i a ingresar en estado k .

C. Conjuntos:

Familias de productos $i = 1, \dots, 12$

Estanterías $j = 1, \dots, 25 \quad i \subseteq J, i \neq j$

Estados en bodega, estos dependerán del número de zonas que se definan, para este caso sería entonces:

1(en cuarentena), 2(retenido), 3(rechazado), 4(aprobado) y 5(en alistamiento)

Periodos de tiempo, se define la unidad de tiempo en la que será más conveniente evaluar $t=1, \dots$, (semestres)

D. Modelo matemático (Zmin):

$$\begin{aligned} Z &= \sum_t \sum_j \sum_i u_{it} de_j e_i y_{ij} + \sum_t \sum_j \sum_i u_{it} de_j q_i x_{1j} \\ &+ \sum_t \sum_{k=2,3,4} \sum_{i \neq j} \sum_j \sum_i p_{ik} u_{it} q_i d_{ji} y_{it} x_{1j} x_{ki} \\ &+ \sum_t \sum_{i \neq j} \sum_j \sum_i z_{it} d_{ji} y_{ij} x_{5t} + \sum_t \sum_j \sum_i z_{it} d_{aj} x_{5t} \end{aligned}$$

La función objetivo se compone de las siguientes partes:

1. Distancias recorridas por los productos $i=1, \dots, 12$ que entran directamente al estante j donde se encuentra la zona de Aprobado en un periodo de tiempo t .

2. Distancias recorridas por los productos $i=1, \dots, 12$ que entran directamente a Cuarentena.

3. Distancias recorridas por los productos $i=1, \dots, 12$ que se mueven de la zona de Cuarentena a la zona de Aprobado, Retenido o Rechazado.

4. Distancias recorridas por los productos $i=1, \dots, 12$ que se mueven de la zona de Aprobado a la zona de Alistamiento.

5. Distancias recorridas por los productos $i=1, \dots, 12$ que se mueven de la zona de Alistamiento a la salida.

E. Sujeto a:

$$\sum_j cap_j y_{ij} \geq p_{it} u_{it} \quad \forall i, t$$

La capacidad de los estantes asignados a la zona de Aprobado debe ser mayor o igual a la cantidad de producto que i que ingresa a dicha zona en un periodo de tiempo t .

$$\sum_i q_i u_{it} x_{1j} \leq cap_j \quad \forall j, t$$

La capacidad de los estantes asignados a la zona de Cuarentena debe ser mayor o igual a la cantidad de producto que ingresa en esta zona en un periodo de tiempo t .

$$\sum_i z_{it} x_{5j} \leq cap_j \quad \forall j, t$$

La capacidad de los estantes asignados a la zona de Alistamiento debe ser mayor o igual a la cantidad de producto que sale de la bodega por requerimiento del área de producción en un periodo de tiempo t .

$$\sum_i y_{ij} = 1 \quad \forall j$$

Esta restricción implica que cada producto solo va a tener asignado una ubicación a la vez.

$$\sum_j y_{ij} \geq 1 \quad \forall i$$

Cada producto debe tener una posición asignada.

$$\sum_k x_{kj} = 1 \quad \forall j$$

Cada zona, solo va a tener asignado un estante a la vez.

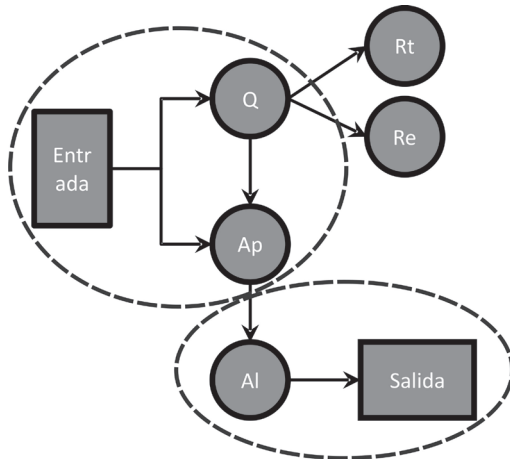
$$\sum_j x_{kj} \geq 1 \quad \forall k$$

Cada zona debe tener un estante asignado.

V. DESARROLLO DE LA HEURÍSTICA

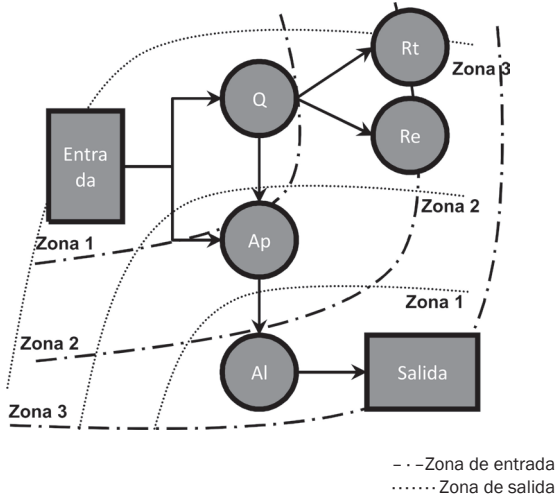
Los pedidos que entran con mayor frecuencia son aquellos que necesitan estar cerca de la entrada y aquellos que salen más frecuentemente necesitan estar cerca de la salida. En una típica bodega se maneja el siguiente flujo de producto clasificados por estado del producto que se muestra en la Fig. 3:

FIG. 3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MATERIAL EN BODEGA



Q: EN CUARENTENA; AP: APROBADO; AL: EN ALISTAMIENTO;
RT: RETENIDO; RE: RECHAZADO

FIG. 4. DIVISIÓN DE LA BODEGA EN ZONAS



De acuerdo a este diagrama de la Fig. 3, se detectan dos zonas de importancia: La zona de entrada y la zona de salida. El arreglo dependerá entonces de la cantidad de flujo de producto que transita de una estantería a otra. Por lo tanto, la heurística contempla la división de la bodega en zonas, como lo hace el procedimiento cube-per-order, sin embargo, a diferencia de este último, se trabajará la importancia relativa según el flujo de estibas por producto, divididos en la cantidad que sale versus la cantidad que entra. Entonces, se hablará de dos subgrupos: zonas de salida y zonas de entrada. En cada subgrupo están delimitados las zonas 1, 2 y 3 que va de mayor cercanía a la salida o la entrada, tal como se muestra en la Fig. 4.

Procedimiento:

PASO 1: Levantar un plano de la bodega y dividirlo en zonas, para clasificarlas en las dos zonas mencionadas. Todas las estanterías deben estar asignadas en ambos tipos de zonas.

PASO 2: Calcular las capacidades de las zonas.

PASO 3: Calcular el número de estibas que ingresan y salen de bodega por familia de producto en un periodo de máximo mantenimiento de inventario, esto se puede hacer mediante la determinación de la demanda diaria del producto, y multiplicarla por el número de días que se maneja de inventario.

PASO 4: Hacer dos listados, uno para los productos que salen y otro para los que entran, en el que se ordenan de mayor a menor y para el listado de los productos que entran, indicar con valor de 1 si el producto entra a cuarentena y 0 si no entra.

PASO 5: Asignar los productos en las zonas de entrada y salida, de acuerdo con el ordenamiento sugerido en el listado y respetando las capacidades de cada zona. En la asignación de zonas de salida, se debe primero colocar la zona de alistamiento antes de asignar los productos en las estanterías.

PASO 6: De acuerdo con las zonas se hace un listado específico en estanterías, se asignan los productos a las estanterías, según la coherencia del listado de entradas con el de salidas.

PASO 7: Evaluar función objetivo inicial

PASO 8: Aleatoriamente seleccionar 2 zonas e intercambiarlos.

PASO 9: Evaluar función objetivo con las modificaciones.

PASO 10: Si el valor es menor al anterior, ir al paso 11, de lo contrario regresar al paso 8, sin modificar la solución anterior.

PASO 11: Seleccionar solución mejorada e ir al paso 8.

PASO 12: El criterio de salida estaría establecido por el porcentaje de cambio entre un arreglo y otro. Se detiene el procedimiento, una vez el porcentaje de cambio se haya mostrado poco significativo en arreglos seguidos.

VI. APLICACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO PARA EL CASO DE UNA EMPRESA DEL SECTOR INDUSTRIAL

A. Datos de Entrada

En la bodega de material expuesta se manejan 5 estados de los productos, como se mostró en la Fig. 3. De manera general se debe tener cuenta:

- Porcentaje de producto que entra a Aprobado o a Cuarentena.
- En caso de entrar a Cuarentena, número de días que permanece este estado hasta ser ubicado en Aprobado, Retenido o Rechazado.
- Restricciones de incompatibilidad entre un producto y otro, es decir, x producto específico debe estar separado de y producto por políticas de la empresa.
- Porcentaje de material Rechazado y Retenido según las estadísticas.
- Si se sabe que todos los productos deben pasar por el área de Alistamiento para salir de la bodega, entonces, especificar cuánto demoran en esta área.

Establecer si existen algunas restricciones de movilidad de las áreas. Esto puede ser porque algunos estantes están adecuados especialmente para recibir cierto tipo de producto.

- Dado que para que un producto salga tiene que pasar por el área de Alistamiento, se tomará esta como el área de Salida.
- Como se mencionó anteriormente, para adaptar el modelo de CPO a la bodega, se tendrá en cuenta que cada estiba es una orden debido a su modelo de *Picking, out-and-back*.
- Finalmente, las unidades a manejar son en metros y en estibas.
- Aplicándolo a las condiciones de la bodega ejemplo se tienen los siguientes detalles para empezar:

Existen 12 familias de productos que maneja la empresa, de los cuales no se tendrán en cuenta las familias 3 y 8 debido a que no hacen parte del material manejado en dicha bodega.

- Los productos manejan un porcentaje de entradas directas a Cuarentena muy parecido al 70% según información estadística. Y luego permanecerá en esta área en un periodo no superior a 3 días.

- De los lotes recibidos no más del 3% resulta Rechazado y no más del 2% Retenido.
- Como ya se sabe todos los productos deben pasar por el área de Alistamiento antes de salir de la bodega para responder a un pedido. Y no demoran más de 2 días en esta área.
- La zona de cuarentena debe estar ubicada en las estanterías del centro, ya que de esta zona se dirigen hacia el resto de los estantes las estibas.
- La estantería de alistamiento es la única fija en toda la bodega. El área de alistamiento debe estar ubicado en cierto estante debido a que ésta estantería está especialmente adecuada para el recibo de las órdenes
- El área de Rechazado y Retenido deben estar juntas y en un área de la bodega donde puedan ser encerradas ya solo personal autorizado tiene acceso a esta área. Para entrar se necesita orden de Calidad y para retirar algún material se necesita orden de Jefe de Bodega y de Calidad.
- Existen dos áreas de Cuarentena, ya que ciertos productos tienen incompatibilidad.
- Se procede entonces a desarrollar los pasos con la información suministrada.

B. Aplicación del Modelo Desarrollado

PASO 1: En los siguientes diagramas (Fig. 5 y 6) se muestran las zonas de entrada y las zonas de salida subdivididas.

FIG. 5. ZONA DE ENTRADA

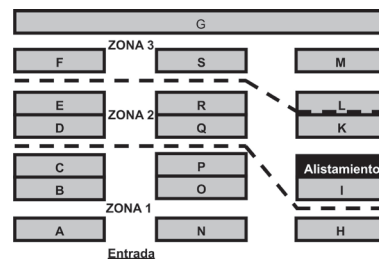
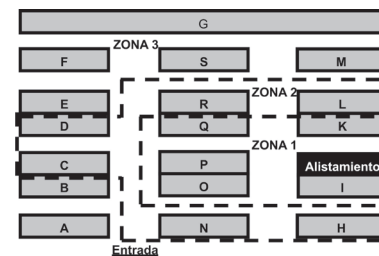


FIG. 6. ZONA DE SALIDA



PASO 2: Según las zonas establecidas la capacidad asignada sería la siguiente que se muestra en la Tabla I para las entradas y en la Tabla II para las salidas:

TABLA I ZONA DE ENTRADA

ZONA	Capacidad	Porcentaje (%)	Estantes
1	1000	35	A, B, C, H, N, O, P
2	956	34	D, E, I, J, K, Q, R
3	888	31	F, G, M, S
Total	2844	100	

TABLA II ZONA DE SALIDA

ZONA	Capacidad	Porcentaje (%)	Estantes
1	1030	36	I, J, K, O, P, Q
2	834	29	C, D, H, L, N, R
3	980	34	A, B, E, F, G, M, S
Total	2844	100	

La zona 2 en este caso tiene menor capacidad debido a la distribución de las estanterías en el espacio de la bodega.

Para la zona de salida, se tiene como centro el área de alistamiento debido a que pasa salir de la bodega, todos los materiales deben pasar por esta área.

PASO 3: A continuación se presenta la información detallada de cada línea y zona de la bodega en la Tabla III.

Se tiene la demanda diaria (Dd.) de cada línea (L) (unidad: Estibas).

- Tiempo máximo de inventario (T. máx.): tiempo máximo que dura una estiba en la bodega. Esto indica para cuanto tiempo tienen inventario programado para cierto producto (unidad: días).
- Capacidad teórica (Cap. Th.): según la demanda diaria y el tiempo máximo de inventario se obtiene esta capacidad, que indica cuanto debería ser la capacidad asignada en la bodega (unidad: Estibas).
- Capacidad asignada (Cap. A): según los estantes asignados en la bodega (unidad: Estibas).
- Delta (Δ): indica cuanto por encima o por debajo tiene la cantidad asignada con respecto a la teórica. Un porcentaje negativo indica que la capacidad asignada es inferior a la teórica y un porcentaje positivo indica lo contrario.

- %Q: porcentaje de producto que normalmente va directamente hacia Cuarentena.
- %R: porcentaje de producto que normalmente va directamente hacia el área de Rechazado por problemas de calidad para ser devuelto al proveedor.
- %Rt: porcentaje de producto que normalmente va directamente hacia el área de Retenido esperando confirmación de Calidad para asignarlo como rechazado o aprobado, debido a que existen anomalías y no hay pruebas suficientes de laboratorio para asignarlo directamente a alguna de las dos zonas mencionadas.

Con respecto a las áreas de la bodega, se identificaran de la siguiente forma:

- a: Alistamiento
- q: Cuarentena
- q2: zona de Cuarentena en la que sólo pueden colocarse los productos 4, 5 y 7
- r: Rechazado
- rt: Retenido

TABLA III Información de cada línea y zona de la bodega

L	Dd.	T máx.	Cap. Th.	Cap. A.	Δ	% Q	% R	% Rt
1	0,5	365	183	176	-4%	70%	5%	2%
2	0,8	180	137	128	-6%	70%	5%	2%
4	0,6	150	88	84	-5%	100%	5%	2%
5	3	60	185	204	10%	100%	5%	2%
6	5	90	458	400	-13%	70%	5%	2%
7	49	8	390	432	11%	100%	5%	2%
9	0,4	365	159	160	1%	70%	5%	2%
10	0,7	180	127	112	-12%	70%	5%	2%
11	1,0	180	181	200	10%	70%	5%	2%
12	3,1	90	282	324	15%	70%	5%	2%
a	69	1,5	103	90	-12%	-	-	-
q	48	5	238	108	-55%	-	-	-
q2	49	3	148	162	9%	-	-	-
r	1	180	123	140	14%	-	-	-
rt	1	60	41	40	-3%	-	-	-

Fuente: información empresa 2009

PASO 4: Se realiza el listado de productos en orden de importancia según su demanda:

1) Entradas:

En este caso, como todas las líneas entran en algún porcentaje a cuarentena directamente, entonces la asignación de 1 y 0 no es necesaria pues entonces todas las líneas serían 0. A continuación se muestra en la Tabla IV el total de estibas por línea:

TABLA IV Listado de productos en orden de importancia según el número de entradas

ENTRADAS		
Línea	Estibas totales/Línea	
1	7	17777
2	6	1857
3	12	1145
4	5	1127
5	11	368
6	2	278
7	10	258
8	4	215
9	1	183
10	9	159

2) Salidas:

Para el caso de las salidas, se puede observar en la Tabla V que la mayoría de las posiciones se conservan. La posición 7 y 8 se encuentran invertidas, al igual que la posición 9 y 10.

Tabla V Listado de productos en orden de importancia según el número de salidas

SALIDAS		
Línea	Estibas totales/Línea	
1	7	10429
2	6	1560
3	12	801
4	5	638
5	11	306
6	10	162
7	2	157
8	1	154
9	4	127
10	9	112

En este caso se tomará el orden de entrada como el orden general de los productos ya que esta información es de mayor confiabilidad, según el manejo de la información que se tiene en la empresa. Sin embargo, normalmente, sería preferible utilizar la información de Salida, ya

que ésta nos indica la demanda real que tiene la empresa según las ordenes de pedido que recibe.

PASO 5: Asignación de líneas de productos a estanterías según zonas 1, 2 y 3.

1) Entradas (desde Cuarentena):

Se toma las entradas únicamente desde cuarentena ya que el número de entradas hacia esta zona es más significativa que a las estanterías. A partir de esto se puede tener un punto de referencia que puede ser modificado, una vez se tengan las líneas ubicadas en los estantes.

Al realizar el acomodamiento para las líneas que van desde Cuarentena a los estantes quedaría de la siguiente manera como se muestra en la Tabla VI:

TABLA VI Ubicación de las líneas en los estantes desde Cuarentena

Estante	Línea
A	12
B	12
C	q2
D	6
E	10
F	1
H	2, 10, 1
I	2
J	a, 6
K	6, 12
N	1, 11
O	11
P	6
Q	q
R	9
S	3, 9

Para el caso de entradas desde la Cuarentena q2 se tiene la siguiente información en la Tabla VII como resultado:

TABLA VII Ubicación de las líneas en los estantes desde Cuarentena q2

Estante	Línea
A	7
B	7
C	q2
D	7
E	4
N	5
O	5
P	7

2) Salidas (desde Alistamiento):

Para el caso de las salidas, se toma de manera general los movimientos desde los estantes hasta la zona de alistamiento. Las líneas quedarían ubicadas de la siguiente forma como se muestra en la Tabla VIII:

TABLA VIII Ubicación de las líneas en los estantes desde la salida

Estante	Línea
A	8, 9, d
B	1
C	q2
D	5
E	1, 9
F	9
G	2, 10, r, rt
H	6, 12
I	6
J	a, 7
K	7
L	12
M	11, 12
N	1, 2, 4, 11, 12, 6
O	6
P	7
Q	q
R	5
S	1, 4, 11

PASO 6: Se realiza una comparación entre las ubicaciones resultantes de cada uno de los análisis, entradas y salidas. Comparándolos se obtiene la Tabla IX:

TABLA IX Comparación entre análisis de zonas

Estante	Líneas		
	Entradas q	Entradas q2	Salidas
A	12	7	8, 9, d
B	12	7	1
C	q2	q2	q2
D	6	7	5
E	10	4	1, 9
F	1		9, r
G			2, r, rt
H	1, 2, 10		6, 12
I	2		6
J	a, 6	a	a, 7

K	6, 12		7
L			12
M			11, 12
N	1, 11	5	1, 2, 4, 6, 11, 12
O	11	7	6
P	6		7
Q	Q	q	q
R	9		5
S	3, 9		1, 4, 11

Al cruzar la información obtenida, y después de evaluar distancias en las posiciones, se tiene el siguiente resultado final mostrado en la Tabla X:

TABLA X Ubicación de las líneas en los estantes

Estante	Línea
A	8, 9, d
B	1
C	q2
D	5
E	1, 9
F	9, r
G	2, 10, r, rt
H	6, 12
I	6
J	a, 7
K	7
L	12
M	11, 12
N	1, 2, 4, 6, 11, 12
O	6
P	7
Q	q
R	5
S	1, 4, 11

A través del uso de la heurística establecida se obtuvieron los siguientes resultados:

Distancia total en el año 2009:

Total distancia 2009 (km): 2.971

Y la distancia total obtenida utilizando los pasos anteriormente descritos fue:

Total distancia (km): 1.738

Es decir, 41% menos de distancia recorrida que la obtenida en el 2009 con las ubicaciones actuales.

La aplicación de este método resultó de gran ayuda ya que las diferencias obtenidas en distancias recorridas es considerablemente alta, de esta manera se utilizan los recursos para el almacenamiento de una manera más eficiente y se reducen costos.

VII. CONCLUSIONES

En el proceso de Picking, los objetivos que se persiguen son varios: aumentar productividad, aumentar asertividad y disminuir los tiempos de ciclo. La productividad se expresa en número de producto recogido por unidad de tiempo. La asertividad se refiere al porcentaje de embarques que le llegan correctamente al cliente y esto generalmente se logra por medio de un sistema riguroso de control. El tiempo de ciclo se refiere al tiempo desde que la orden fue ingresada al sistema hasta que esta haya sido despachada.

Por otro lado, para mejorar la asignación de espacios en una bodega, los expertos recomiendan utilizar los espacios de mayor acceso para aquellos productos que tienen alta rotación. Incluso, se habla de tener esos productos cerca de las bandas transportadoras o de rápido acceso en las hileras con el fin de minimizar la operación de Picking. También se recomienda que los productos que se distribuyen juntos se almacenen juntos y aquellos productos muy grandes o pesados colocarlos en espacios donde no se corra el riesgo de accidente para los operadores de Picking y almacenamiento.

Para el caso estudiado y mediante una generalización para las empresas, se considera que el sistema óptimo de posicionamiento de las zonas en estanterías tiene que ver con la optimización tanto del espacio como la del picking. Por lo tanto una mezcla de las distancias con la popularidad del producto se convierte en una optimización de recorridos en la bodega. Conocidas las restricciones existentes y subdividiéndolas en zonas de mayor a menor cercanía de las salidas y de las entradas, fue posible obtener un arreglo coherente y adecuado para este tipo de bodegas. Los resultados generados demuestran el potencial de esta heurística que pretende para un futuro ser una de gran alcance para muchas otras aplicaciones, con resultados que para la empresa se traducen en ganancia.

El objetivo principal de esta heurística es lograr una mayor organización de los productos al inte-

rior de una bodega. A partir de esto y dependiendo de la eficiencia de los resultados obtenidos, esta mejora tendrá como consecuencia una mejor trazabilidad de los productos, una disminución de los tiempos y movimientos, mayor facilidad al momento de la ubicación, es decir, cambio en todos los procesos vitales en todo el sistema de almacenamiento.

Reconocimientos

Este artículo es el resultado de un proyecto patrocinado por el Instituto Colombiano para el Desarrollo en Ciencia y Tecnología "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS) con el Centro de Investigación en Modelación empresarial del Caribe-FCIMEC, No. 25947.

REFERENCIAS

- [1] COLLINS, K. (2008). *Best Practices for Picking in Warehouses and Distribution Centers*. Recuperado el 22 de Febrero de 2010, de: <http://www.smartturn.com/forums/blogs/kevin-collins/11-best-practices-picking-warehouses-distribution-centers.html>
- [2] DE KOSTER, R., LE-DUC, T., & ROODBERGEN, K. J. (2007). Design and Control of Warehouse Picking: A Literature Review. *European Journal of Operational Research*, 182, 481-501.
- [3] BARTHOLDI III, J. J., & SUBRAMANIAN, S. (2007). *Pick-path optimization*. Recuperado el 25 de Febrero de 2010, de: <http://www2.isye.gatech.edu/~jjb/wh/apps/pickpath/pickpath.html>
- [4] ROODBERGEN, K. J., SHARP, G. P., & F.A., I. (2008). *Designing the layout structure of manual order picking areas in warehouses*. Recuperado el 25 de Febrero de 2010, de: <http://www.entrepreneur.com/tradejournals/article/print/187011547.html>
- [5] SHUHUA, M., & YANZHU, H. (2009). Research on the Order Picking Optimization Problem of the Automated Warehouse. *2009 Chinese Control and Decision Conference* (págs. 990-994). IEEE.
- [6] TANG, H., & LI, M. (2009). An Improved Ant Colony Algorithm for Order Picking Optimization Problem in Automated Warehouse. En *Fuzzy Information and Engineering Volume 2* (Vol. 62, págs. 1537-1547). SPRINGER-VERLAG.

- [7] KALLINA, C., & LYNN, J. (1976). Application of the Cube-per-order index rule for stock location in a distribution warehouse. *Interfaces* , 7 (1), 37-46.
- [8] PETERSEN, C. (1997). An evaluation of order picking routing policies. *International Journal of Operations & Production Management* , 17 (11), 1098-1111.
- [9] HALL, R. (1993). Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse. *IEEE Transactions* , 25 (4), 76-87.
- [10] ROODBERGEN, K., & VIS, I. (2006). A model for warehouse layout. *IEEE Transactions* , 38 (10), 799-811.
- [11] CARON, F., MARCHET, G., & PEREGO, A. (2000). Optimal layout in low-level picker-to-part systems. *International Journal of Production Research* , 38 (1), 101 – 117.
- [12] LE-DUC, T., & DE KOSTER, R. (2005). Layout Optimization for class-based storage strategy warehouses. En R. DE KOSTER, & W. DELFMANN, *Supply chain management: European perspectives* (págs. 198-222). Copenhagen: Copenhagen Business School Press.