

# Modelamiento del ruteo del acomodo de tiempo mínimo en centros de distribución (CEDI) usando Búsqueda Tabú

Revista Soluciones de Postgrado EIA, Número 12, pp. 15-28. Envigado, enero-junio de 2014

---

Alexánder Alberto Correa Espinal\*

Elkin Rodríguez Velásquez\*\*

Rodrigo Andrés Gómez Montoya\*\*\*

---

\* Departamento Ingeniería de la Organización, Universidad Nacional de Colombia.  
Correo electrónico: alcorrea@unal.edu.co

\*\* Departamento Ingeniería de la Organización, Universidad Nacional de Colombia.  
Correo electrónico: erodrigu@unal.edu.co

\*\*\* Facultad de Ciencias Agrarias, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.  
Correo electrónico: ragomez@elpoli.edu.co

## MODELAMIENTO DEL RUTEO DEL ACOMODO DE TIEMPO MÍNIMO EN CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (CEDI) USANDO BÚSQUEDA TABÚ

Alexánder Alberto Correa Espinal, Elkin Rodríguez Velásquez, Rodrigo Andrés Gómez Montoya

### *Resumen*

El artículo tiene como objetivo desarrollar un metaheurístico de Búsqueda Tabú para configurar rutas de acomodo, que se modelan como un problema del tipo TSP (*Traveling Salesman Problem*), con el fin de obtener secuencias de  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  para ubicar  $n$  productos  $i$ , en el menor tiempo posible. El metaheurístico de Búsqueda Tabú implementado en la operación de acomodo en la empresa de alimentos en la ciudad de Medellín, permite la reducción del tiempo y costos del 7 %, lo que equivale a un ahorro en tiempo de 383 min/mes y 750.000 \$/mes respecto a la estrategia PLPC (Posición más Lejana, Posición más Cercana), lo cual, permite incrementar la eficiencia de la operación y el CEDI.

**Palabras claves:** acomodo; Búsqueda Tabú; centros de distribución (CEDI); metaheurísticos; ruteo.

## MODELING PUTAWAY ROUTING OF TIME MINIMUM IN DISTRIBUTION CENTER USING TABU SEARCH

### *Abstract*

The article aims to develop a tabu search metaheuristic to set putaway routes, which is modeled as a problem TSP (Traveling Salesman Problem), in order to obtain sequences of  $m$  positions of storage  $j$  to place  $n$  products in the minimum time. The tabu search metaheuristic was implemented in the putaway operation of a Food company in Medellin, allowing the reduction of time and cost of 7 %, what amounts to a cost savings of \$ 750000 a month and 383 minutes a month compared to a FLCL (Farthest Location -Closest Location) routing strategy, currently being used by the Food company, which allows to increase the efficiency of the operation and Distribution Center (DC).

**Keywords:** Distribution Center; Metaheuristics; Routing; Putaway; Tabu Search.

## MODELAGEM DO ROTEAMENTO DE ALOJAMENTO DE TEMPOS MINIMOS DE CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO (CEDI MÍNIMOS) USANDO PESQUISA TABU

### *Resumo*

O artigo tem como objetivo desenvolver uma metaheurística busca tabu para configurar rotas de alojamento, que são modelados como um problema do tipo TSP (Traveling Salesman Problem), a fim de obter as sequências de  $m$  posições de armazenamento  $j$  para localizar  $n$  produtos  $i$ , no menor tempo possível. As metaheurísticas busca tabu implementadas na operação de alojamento no negócio de alimentos na cidade de Medellín, permite reduzir o tempo e os custos de 7 %, o que equivale a uma economia de tempo de 383 min / mês e 750000 dólares / mês para a estratégia PLPC (Posição mais distante, posição mais próxima), o que permite aumentar a eficiência da operação e da CEDI.

**Palavras-chave:** Alojamento; Busca Tabu; Os centros de distribuição; metaheurísticas; Routing.

# Modelamiento del ruteo del acomodo de tiempo mínimo en centros de distribución (CEDI) usando Búsqueda Tabú

Alexánder Alberto Correa Espinal, Elkin Rodríguez Velásquez, Rodrigo Andrés Gómez Montoya

Recibido: 15 de octubre de 2013. Aprobado: 23 de diciembre de 2013  
Revista Soluciones de Postgrado EIA, Número 12. pp. 15-28. Envigado, enero-junio de 2014

## 1. Introducción

En la última década los centros de distribución (CEDI) se han convertido en un proceso clave que impacta los costos y la prestación del servicio al cliente en el sistema logístico de las empresas en la cadena de suministro (Frazelle & Sojo, 2007). Por estos motivos, cobra importancia la utilización de modelos cuantitativos para apoyar decisiones de diseño y mejoramiento de las operaciones y recursos, buscando que estas operen de manera eficiente y eficaz (Baker & Canessa, 2009) (Gu, Goetschalckx, & McGinnis, 2010).

El CEDI es un proceso que permite regular los flujos de información y productos de los actores de la cadena de suministro a través de la planeación, implementación, control y mejoramiento de las operaciones de recepción, acomodo, almacenamiento, inventarios, preparación de pedidos y despacho. Por estos motivos, el CEDI, permite atender los requerimientos de los clientes internos y externos garantizando el cumplimiento de

tiempo, cantidades, referencias y calidad pactada (Baker & Canessa, 2009), (Gu, Goetschalckx, & McGinnis, 2010).

En los CEDI, la operación de acomodo ha cobrado importancia, ya que representa un 15 % de los costos de operación de este proceso logístico, y se encarga de ubicar adecuadamente los productos en las posiciones de almacenamiento, lo cual puede impactar en la confiabilidad del inventario y la agilidad de las operaciones de preparación de pedidos y despacho (Frazelle & Sojo, 2007). Por este motivo, esta operación puede considerarse como crítica en la eficiencia y eficacia en el CEDI en la cadena de suministro

En la operación de acomodo se requiere tomar decisiones relacionadas con la asignación de posiciones de almacenamiento, conformación de lotes y ruteo para la ubicación de los productos en las posiciones de almacenamiento, en las cuales permanecen antes que sean demandadas por el proceso de

producción u otro eslabón de la cadena de suministro.

Respecto a la exploración del estado del arte, en la literatura científica se han desarrollado artículos relacionados con el problema de asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*) para realizar el acomodo, sin embargo no se identifican modelos relacionados con el ruteo para ubicar los productos en las posiciones de almacenamiento.

En la asignación de las posiciones de almacenamiento en el acomodo, Heragu *et al.*, (2005) desarrollan un modelo de optimización para determinar la asignación de productos y las áreas de las operación acomodo buscando minimizar costos de almacenamiento y manipulación. Por su parte, Muppanimuppant & Adil (2008) modelan un metaheurístico *Simulated Annealing* para la formación de las clases y *slotting* considerando las posibles combinaciones de referencias, costo de espacio de almacenamiento y preparación de pedidos. En tanto, Hou, Wu, & Yang (2010) modelan un sistema de información para la operación de acomodo para apoyar la asignación, mantenimiento, reubicación e inventario en las posiciones de almacenamiento. Debe considerarse que no estima el ruteo como las funcionalidades de apoyo en la operación del acomodo. Finalmente, Kim y Smith (2012) desarrollan una metodología para la asignación de los SKUs (*Stock Keep Units*) a las posiciones de almacenamiento en la zona

de preparación de pedidos de un CEDI utilizando un metaheurístico como el *simulated annealing*.

A partir de la revisión exploratoria del estado del arte se identifica la oportunidad de investigación, de modelar e implementar un metaheurístico para el ruteo del acomodo resolviendo el problema TSP (*Travelling Salesman Problem*) de mínimo tiempo, que permita contribuir al aumento de la eficiencia y productividad de la operación. De esta manera, se busca contribuir a la agenda de investigación del tema utilizando modelos cuantitativos.

A partir de la información revisada en la exploración del estado del arte y la identificación de la oportunidad de investigación, se establece como objetivo para el artículo desarrollar un metaheurístico de Búsqueda Tabú para configurar rutas de acomodo, que se modelan como un problema del tipo TSP (Traveling Salesman Problem), con el fin de obtener secuencias de  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  para ubicar productos  $i$ , en el menor tiempo posible. Con este objetivo, no solo se busca contribuir a la eficiencia de la operación, sino contribuir al desarrollo de esta línea de investigación de la logística.

Para alcanzar el objetivo se utiliza una metodología basada en el uso de información primaria y secundaria, que permitan desarrollar el metaheurístico de Búsqueda Tabú para solucionar el

problema combinatorial de enrutamiento, y su implementación en un caso de estudio sobre el CEDI de una empresa producción y comercialización de alimentos procesados para el mercado de las comidas rápidas.

El artículo se divide en las siguientes etapas: en la primera parte se desarrolla un metaheurístico de ruteo de mínimo tiempo en la operación de acomodo en el CEDI. En la segunda, se muestra el caso de estudio de implementación del metaheurístico de ruteo en un CEDI, de la ciudad de Medellín, Colombia. Finalmente, en la tercera parte se presentan las conclusiones del trabajo.

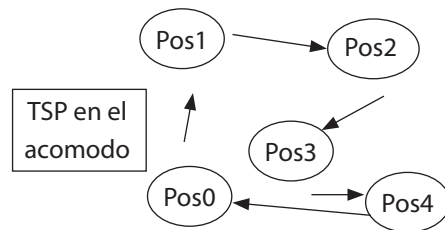
## 2. Modelamiento de metaheurístico para el ruteo de mínimo tiempo en la operación de acomodo en el CEDI

El objetivo es desarrollar un modelo de ruteo para la operación de acomodo basado en un metaheurístico de búsqueda tabú desarrollado para solucionar el problema tipo TSP (Traveling Salesman Problem), que permita establecer la secuencia de las posiciones de almacenamiento que se deben visitar para reducir el tiempo de la operación, lo cual impacta en la eficiencia y eficacia del proceso.

El modelo de ruteo de Búsqueda Tabú se desarrolla en el lenguaje de programación JAVA®, y se integra con un WMS

de uso libre, el cual permite generar intercambios de información de los resultados del modelo para una adecuada gestión de la operación de acomodo en el CEDI.

Se resuelve el problema de TSP que surge para el ruteo de la operación de acomodo, ya que su solución permite hallar una secuencia para visitar las posiciones de almacenamiento una sola vez en la ruta, con el fin de minimizar distancia o tiempo en ella, iniciando y terminando en el mismo lugar dentro del CEDI (ver **Figura 1**).



**Figura 1.** Ruta de acomodo con TSP

El problema de ruteo para el acomodo puede plantearse mediante la siguiente formulación matemática del TSP, que busca obtener secuencias de  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  para ubicar  $n$  productos  $i$ , en el menor tiempo posible, lo cual impacta en la eficiencia de la operación. En la función objetivo debe tenerse en cuenta que  $t_{ij}$  es un coeficiente que representa el tiempo entre las posiciones  $i$  y  $j$  en la ruta de acomodo.

Variable de decisión:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el tramo } ij \text{ pertenece a} \\ & \text{la ruta del operador.} \\ 0, & \text{si el tramo } ij \text{ no pertenece} \\ & \text{a la ruta del operador.} \end{cases}$$

Función Objetivo:

$$\text{Min } \sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} t_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1,n} x_{ij} = 1 \text{ para cada } i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1,n} x_{ij} = 1 \text{ para cada } j \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \neq i, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \text{ para } S \subset N \quad (4)$$

$$j, i = 1, 2, \dots, n.$$

Las restricciones (2) y (3) garantizan que las posiciones de almacenamiento donde se ubican los  $n$  productos a acomodar, se visiten una sola vez en la ruta, lo cual, contribuye a la validez del modelo y a la eficiencia de la operación. Por su parte, la restricción (4) evita la creación de *subtours*, que afectan la validez de las rutas de acomodo de mínimo tiempo. Debe tenerse en cuenta en la restricción (4), que  $S$  representa la ruta de acomodo generada, y  $N$  las rutas factibles en el vecindario.

Para resolver el problema TSP para obtener rutas de acomodo de mínimo tiempo, se desarrolla un metaheurístico de Búsqueda Tabú con estrategias de intensificación y diversificación. La justificación de la selección del metaheurístico de Búsqueda Tabú, que permite resolver el problema genérico de ruteo en

el acomodo en CEDI con  $m$  posiciones de almacenamiento. Con este enfoque, se pueden modelar CEDI con pocas o muchas posiciones de almacenamiento. En el caso de modelos de optimización, estos pueden presentar restricciones cuando existen más de 30 nodos, ya que se aumenta el uso de memoria computacional, y se pueden generar altos tiempos de procesamiento, que pueden afectar la obtención de soluciones para el problema TSP o VRP (*Vehicle Routing Problem*) (Choi y Tcha, 2007) (Duhamel, Lacomme y Prodhon, 2012), (Penna, Sunramanian y Ochi, 2013). Por estos motivos, con la implementación de metaheurísticos, y en el presente caso, la Búsqueda Tabú se establece un enfoque genérico para solucionar el problema de ruteo de mínimo tiempo en el acomodo, lo cual busca contribuir a la eficiencia y al desarrollo de la línea de investigación en el CEDI.

El desarrollo del metaheurístico de búsqueda tabú para el ruteo en la operación de acomodo considera los siguientes elementos que permiten su modelamiento, buscando reducir los tiempos de la operación (ver **Figura 2**).

El metaheurístico de búsqueda tabú fue elaborado utilizando como base el *Framework* OpenTS desarrollado en lenguaje programación JAVA®, en el cual se adapta el ruteo para la operación de acomodo en el CEDI. A continuación se presenta el pseudocódigo del mismo (ver **Figura 3**).

<b>Solución Inicial</b>	<b>Generador de vecinos</b>
Ruta de acomodo inicial, que se toma como semilla del metaheurístico de búsqueda tabú	Permite administrar los movimientos de la búsqueda tabú, con el fin de listar, evaluar y seleccionar el mejor vecino o solución de la ruta de acomodo, la cual se conforma por posiciones de almacenamiento, donde se deben ubicar los productos.
<b>Función objetivo</b>	<b>Lista tabú</b>
Permite evaluar y registrar el tiempo de la ruta de acomodo	Esta registra una lista de parejas de posiciones de acomodo que han sido intercambiadas recientemente, y cuyo intercambio quedan prohibido durante un número de iteraciones ( <i>ternure</i> ).

**Figura 2.** Componentes metaheurístico de Búsqueda Tabú TSP de ruteo de mínimo tiempo para el acomodo

```

Genere una ruta de acomodo inicial  $S_0$ 
Evalúe  $F(S_0)$ , la distancia total recorrida de  $S_0$ 
Haga la solución actual  $S = S_0$ 
Haga la mejor solución hallada  $S^* = S_0$ 
Inicialice la lista tabú  $T$  como vacía  $T = \{ \}$ 
Repita un número de iteraciones  $X$ 
    Genere un vecindario de rutas  $V(S)$  por intercambio de parejas de posiciones de almacenamiento de  $S$ 
    Elija la mejor ruta candidata  $S_c$  de  $V(S)$  generada por el intercambio de una pareja de posiciones que no esté en la lista tabú  $T$ .
    Ingrese las posiciones intercambiadas en  $S_c$  a la lista tabú en orden FIFO.
    Si  $F(S_c) < F(S^*)$ , haga  $S^* = S_c$ 
    Haga  $S = S_c$ 
Fin
    
```

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.** Metaheurístico de Búsqueda Tabú resolver problema TSP ruteo acomodo de mínimo tiempo

Para ejecutar el *framework* se utilizó *Netbeans*, IDE 7.0.1, disponible para Windows en un computador con procesador Intel Pentium 4 de 3.20GHz y memoria RAM de 1 Gb.

### 3. Caso de estudio de la utilización del

### metaheurístico de ruteo de la operación de acomodo en el CEDI

Se selecciona una empresa mediana dedicada a la producción y comercialización de alimentos procesados para el mercado de las comidas rápidas.

Entre los productos más significativos de la empresa se consideran: ensaladas, salsas, patacones congelados, entre otros.

La empresa cuenta con un CEDI de 500 m<sup>2</sup> en el cual se desarrollan las operaciones de recepción, acomodo en posiciones de almacenamiento en estanterías selectivas, gestión del inventario, preparación de pedidos, empaque y despacho. Estas operaciones permiten atender los requerimientos de los clientes en la cadena logística.

La operación de acomodo en el CEDI consiste en la ubicación de los productos en las posiciones de almacenamiento en el menor tiempo o costos posibles. Debe tenerse en cuenta que los productos que se acomodan se reciben de la planta de producción o las entregas de los proveedores de la empresa, ya que algunas líneas de productos se maquilan con terceros. A continuación se presenta una caracterización de la operación de acomodo para la empresa en estudio.

**Tabla 1.** Caracterización operación de acomodo empresa procesadora de alimentos

<b>Objetivo</b>	Realizar un adecuado acomodo de los productos en las posiciones de almacenamiento asignadas garantizando el menor tiempo y costo posibles	
<b>Responsable</b>	Director de almacenamiento	
<b>Actividades</b>	<b>Recursos</b>	<b>Tecnologías de información y comunicaciones</b>
Procesar las órdenes con los productos que ingresan de producción o se reciben de los proveedores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operarios</li> <li>• Muelle de cargue</li> <li>• Muelle de descargue</li> <li>• Plataforma de inspección</li> <li>• Transpaleta</li> <li>• Básculas</li> <li>• Cavas de almacenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Software</i> administrativo para gestión de inventarios, recepción y despacho</li> </ul>
Asignar posiciones de almacenamiento para acomodar los productos en el almacén		
<b><i>Establecer ruta de acomodo de mínimo tiempo</i></b>		
Ubicar los productos en las posiciones de almacenamiento, según la secuencia de la ruta		
Actualizar el inventario		
<b>Indicadores</b>		
Cantidad de productos acomodados por unidad de tiempo Tiempo promedio de acomodo en el almacén Costos de acomodo en el almacén % de eficiencia del acomodo		



A continuación se describen los productos que se utilizan para el desarrollo de las estrategias de ruteo en el CEDI de la empresa de alimentos procesados en estudio

**Tabla 2.** Plan de acomodo de alimentos procesados

Nombre	Unidad de almacenamiento	Empaque	Cantidad a ubicar	Posiciones de almacenamiento			
Ensalada	Unidad	Bolsa	1	1	2	3	4
Salsa de tomate	Unidad	Caja	2	5	6	7	8
Mayonesa	Unidad	Caja	1	9	10	11	12
Salsa de piña	Unidad	Caja	3	13	14	15	16
Huevos codorniz	Unidad	Caja	5	17	18	19	20
Servilletas	Unidad	Caja	4	21	22	23	24

Para identificar las mejoras del uso del metaheurístico de búsqueda tabú desarrollado para solucionar el problema tipo TSP (*Traveling Salesman Problem*) en la operación de acomodo, se comparan los resultados obtenidos por este, contra los obtenidos por una estrategia de ruteo tradicional empleada en los CEDI, la cual consiste en ubicar los productos en las posiciones de almacenamiento desde la más lejana a la más cerca al *depot* (punto de inicio del acomodo).

Las posiciones de almacenamiento donde se deben acomodar los productos, es información de entrada, que no se considera en alcance del problema de ruteo de mínimo tiempo en el acomodo. Inclusive, la asignación de posiciones de almacenamiento se realiza con una estrategia o política ABC basado en la cantidad de productos solicitados en los pedidos de los clientes.

Aunque en el presente caso de estudio el CEDI tiene 24 posiciones

de almacenamiento, lo cual puede considerarse un número pequeño de nodos en un problema TSP, que puede resolverse con modelos de optimización, debe tenerse en cuenta que el metaheurístico de búsqueda tabú modelado ha sido desarrollado, no solo para resolver problemas con pocas posiciones de almacenamiento, sino también para CEDI de grandes cantidades de estas, como se describió anteriormente. Inclusive, en pruebas realizadas al metaheurístico de búsqueda tabú respecto a un modelo de optimización para resolver el problema TSP de ruteo de acomodo, se identificó que se obtenían resultados similares. Esto se plantea ya que la solución inicial de acomodo que utiliza la Búsqueda Tabú, se clasifica como una buena solución, y se implementan estrategias de intensificación y diversificación que permiten una búsqueda detalladas en el vecindario de rutas factibles. De esta manera se resalta la importancia de

la selección de la Búsqueda Tabú para resolver el problema TSP en el acomodo en el CEDI de cualquier tamaño, lo cual permite establecer un enfoque general de solución de un problema con  $m$  posiciones de almacenamiento, lo cual supera la limitación de los modelos de optimización, y se evalúan los resultados que se obtienen en el caso de estudio.

A continuación se desarrolla cada una de estas estrategias de acomodo para resolver el problema TSP en el acomodo, incluyendo la implementación de la Búsqueda Tabú:

- Estrategia 1 para el ruteo de acomodo

Para realizar esta estrategia se parte de la identificación de las posiciones de almacenamiento. Después se organiza la ruta, comenzando por la posición de almacenamiento que se encuentra más lejana a la posición de inicial. Además, debe tenerse en cuenta que en esta estrategia se recorren cada uno de los pasillos en los que se acomodan los productos, y se inicia y termina el recorrido en el mismo punto del CEDI.

La ruta diseñada con esta estrategia para el acomodo (ver **Tabla 1**) se representa a continuación:

x: {0,22,23,24,21,20,19,18,17,16,15,14,13,12,11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1,0}

La implementación de esta ruta de acomodo genera un tiempo de 10,65 minutos para ubicar los productos en la procesadora de alimentos.

- Estrategia 2 de ruteo de acomodo empleando metaheurístico de Búsqueda Tabú

La segunda estrategia para resolver el problema TSP de ruteo para la preparación de pedidos de la empresa comercializadora de café utiliza el metaheurístico de Búsqueda Tabú desarrollado computacionalmente en el *framework OpenTS*, que permite obtener una secuencia de posiciones de almacenamiento a visitar para recoger los bultos de café solicitados por los clientes en la mínima distancia posible.

La ruta de acomodo que se ejecuta con el *framework Open TS*, se evalúa en tres escenarios de diferentes tamaño de lista tabú (ver **Tabla 6**), que se establecen como valores de referencia para estos metaheurísticos y experiencia del equipo de modeladores. Para cada escenario se ejecutan 100 iteraciones, que permiten obtener rutas de acomodo de mínimo tiempo en el acomodo para la empresa de alimentos en estudio.

Con las rutas TSP de acomodo de mínimo tiempo con diferentes tamaños de lista tabú, se obtiene un tiempo promedio de operación de 10,15 minutos con una desviación de 0,17 minutos.

**Tabla 3.** Resultados rutas TSP de preparación de pedidos de mínima distancia diferentes tamaños de lista tabú.

Tamaño Lista Tabú	Tiempo (Minutos)	Ruta
3	10,3	{0, 1, 2, 3, 7, 6, 4, 5, 12, 9, 10, 11, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 19, 20, 21, 24, 18, 22, 0}
5	10	{0, 2, 1, 3, 5, 6, 4, 11, 12, 9, 10, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 20, 21, 24, 19, 22, 0}
7	9,99	{0, 1, 2, 3, 12, 6, 4, 7, 5, 9, 10, 11, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 0}
10	9,9	{0, 1, 2, 3, 5, 6, 4, 7, 12, 9, 10, 11, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 23, 22, 0}

Por efectos prácticos, en el almacén de productos alimentaciones se elige la ruta TSP de acomodo de mínimo tiempo con una lista tabú de tamaño 10:

X: {0, 1, 2, 3, 5, 6, 4, 7, 12, 9, 10, 11, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 23, 22, 0}

Este metaheurístico de ruteo para el acomodo permite obtener un tiempo de ruteo de 9,9 minutos.

- Comparación de tiempos y costos de la estrategia PLPC y el metaheurístico de Búsqueda Tabú para resolver el problema TSP de ruteo de mínimo tiempo

En este apartado se realiza una comparación entre los tiempos, costos y eficiencia entre la estrategia PLPC y el metaheurístico de Búsqueda Tabú para resolver el problema TSP de ruteo.

De esta manera se presentan las mejoras y beneficios, que genera el

metaheurístico de Búsqueda Tabú en el ruteo del acomodo, y el aporte a la agenda de investigación del tema.

Al ejecutar la ruta con la estrategia 1, la tradicional de ruteo en el CEDI de la empresa en estudio, se obtiene un tiempo de acomodo de 10,65 min, mientras que con el metaheurístico de Búsqueda Tabú desarrollado para solucionar el problema tipo TSP, se obtiene un tiempo de 9,90 min conllevando a un ahorro de 0,75 min, equivalente a 45 segundos o 7 % del tiempo de cada viaje, pero se debe considerar que en la empresa en promedio se realizan 50 operaciones de acomodo al día representando un ahorro total en tiempo de 1150 segundos/día, lo cual equivale a 19 minutos/día y 383 min/mes, ya que la empresa labora 20 día al mes.

Respecto a los costos, con la estrategia 2 que consiste en implementar el metaheurístico de Búsqueda Tabú

**Tabla 4.** Análisis comparativo entre las estrategias de ruteo de acomodo PLPC y Metaheurístico de búsqueda tabú

	Tiempo de ruta	Costo/minuto en el almacén	Costos/ruta	Reducción en tiempos/	Reducción de costos
PLPC	10,65 minutos	\$ 1000	10.650 \$/ruta	7,65 %/ruta	7 % /ruta
Metaheurístico de búsqueda tabú	9,9 minutos		9900 \$/		

para resolver el problema TSP de ruteo de mínimo tiempo, se obtiene una reducción de costos por ruta de 7,65 %, equivalente a 750 \$/ruta. Teniendo en cuenta las 50 rutas/día de acomodo, que se realizan en el almacén de la empresa de alimentos en estudio, se puede alcanzar un ahorro por día de \$ 37.500, y por mes de \$ 750.000, teniendo en cuenta que se laboran 20 días/mes.

De esta manera se describen los beneficios técnicos y económicos de la implementación del metaheurístico de Búsqueda Tabú (estrategia 2) para resolver el problema TSP de ruteo de mínimo tiempo respecto a la regla PLPC (estrategia 1).

## 4. Conclusiones

El acomodo es una operación que impacta en la eficiencia y eficacia del CEDI, ya que este permite ubicar los productos en las posiciones de almacenamiento empleando recursos como: equipo de manejo de materiales, personal, entre otros.

Del artículo se establece que el ruteo en el acomodo requiere definir una secuencia de las posiciones que debe visitar un operador del CEDI para ubicar los productos de almacenamiento, utilizando estrategias basadas en la experiencia de los programadores o utilizando modelos matemáticos o metaheurísticos, los cuales buscan disminuir los tiempos o distancias de la operación.

La implementación de la estrategia de ruteo mediante el metaheurístico de Búsqueda Tabú permitió reducir el tiempo de cada viaje (ruta) en 45 segundos, respecto a una estrategia de ruteo basada en acomodar los productos desde la posición más lejana a la más cercana al punto de inicio de la operación. Se debe considerar que en la empresa en promedio se realizan 50 operaciones de acomodo al día, representando un ahorro total en tiempo de 1150 segundos/día, lo que equivale a 19 minutos/día y 383 min/mes, impactando el desempeño de la operación, y el CEDI. Respecto

a los costos, con el metaheurístico de Búsqueda Tabú para resolver el problema TSP de ruteo de mínimo tiempo (estrategia 2), se obtiene una reducción de costos por ruta de 7,65 %, equivalente a 750 \$/ruta, 37.500 \$/día, y 750.000 \$/mes, teniendo en cuenta que se laboran 20 días/mes. De esta manera se muestran los beneficios técnicos y económicos de la implementación del metaheurístico de Búsqueda Tabú para resolver problema TSP de mínimo tiempo.

Como trabajos futuros se considera la inclusión de los siguientes elementos al modelo: el uso de múltiples vehículos con capacidad variable y diferentes tipos de configuraciones de distribución del CEDI, con lo que se busca continuar con la mejora en la eficiencia de este proceso logístico.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico para la ejecución del proyecto de investigación con código Quipu 202010011024, denominado: «Desarrollo de un sistema de administración de almacenes (*Warehouse Management System*) con metaheurísticos para apoyar las decisiones de operación y control de centros de distribución».

También a los auxiliares de investigación del grupo GIMGO, Laura Vélez Calle, ingeniera de sistemas e informática

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y José Daniel Hernández Vahos, ingeniero de sistemas e informática de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## Referencias

- Baker, P., & Canessa, M. (2009). Warehouse design: a structured approach. *European Journal of Operational Research*, 193, 425-436.
- Frazelle, E., & Sojo, R. (2007). Logística de Almacenamiento y Manejo de Materiales de Clase Mundial. Bogotá: Norma.
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. (2010). Solving the forward-reverse allocation problem on a warehouse order picking system. *Journal of the Operational Research Society*, 61, 1013-1021.
- Heragu, S., Du, L., Mantel, R., & Schuur, P. (2005). A Mathematical Model for Warehouse Design and Product Allocation. *International Journal of Production Research*, 43(2), 327-338.
- Hou, J., Wu, Y., & Yang, Y. (2010). A model for storage arrangement and re-allocation for storage management operations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(4), 369-390.
- Kim, B., & Smith, J. (2012). Slotting methodology using correlated improvement for a zone-based carton picking distribution system. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 286-295.
- Kutzelnigg, R. (2011). Optimal allocation of goods in a warehouse: Minimizing the order picking costs under real-life constraints. *3rd IEEE International Symposium* (págs. 65-70). Hungary: Logistics and Industrial Informatics (LINDI).

- Muppanimuppant, V., & Adil, G. (2008). Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach. *Omega*, 609-618.
- Takahama, H., Nishi, T., Konishi, M., & Imai, J. (2002). A determination method of product allocation schedule for warehouse management. *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference* (págs. 1004-1007). Osaka: SICE.