

2014-06-01

Método heurístico para el problema de ruteo de vehículos aplicado a la empresa distribuidora Representaciones Continental

Julio Fuentes Vidal

Universidad Central, Bogotá, Colombia, stratovarious27@gmail.com

Marco Parra León

Universidad Central, Bogotá, Colombia, marcoparraleon@yahoo.com.co

Hernando Alexánder Gutiérrez

Universidad de La Salle, Bogotá, hergutierrez@unisalle.edu.co

Follow this and additional works at: <https://ciencia.lasalle.edu.co/gs>

Citación recomendada

Fuentes Vidal, Julio; Parra León, Marco; and Gutiérrez, Hernando Alexánder (2014) "Método heurístico para el problema de ruteo de vehículos aplicado a la empresa distribuidora Representaciones Continental," *Gestión y Sociedad*: No. 1 , Article 11.

Disponible en:

This Artículo de investigación is brought to you for free and open access by Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in *Gestión y Sociedad* by an authorized editor of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

Método heurístico para el problema de ruteo de vehículos aplicado a la empresa distribuidora Representaciones Continental*

Julio Fuentes Vidal**

Marco Parra León***

Hernando Alexander Gutiérrez****

Recibido: 15 de octubre del 2013. **Aprobado:** 15 de febrero del 2014

Resumen

En este artículo se presenta la viabilidad de aplicar un modelo heurístico de inserción para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y flota heterogénea de una empresa distribuidora de licores. Mediante el análisis de los datos iniciales que suministra la empresa y de los resultados obtenidos, se pretende determinar si el modelo heurístico obtiene mejora en lo concerniente al tiempo y los costos de operación logística, al igual que valida la aplicación del método heurístico. Con base en los resultados obtenidos, el artículo se concentra en afirmar cómo la heurística de inserción aplicada para el problema de ruteo se comporta de forma esperada y acertada. Finalmente, con base en los resultados obtenidos de la investigación, se realizan algunas recomendaciones, como exportar la lectura de la información de los clientes y las demandas generadas cada día a una base de datos, investigar modelos heurísticas propuestos por otros autores, desarrollar un nuevo programa basado en una heurística distinta y probar cómo se comportaría la programación de estos modelos en otros programas.

Palabras clave

Método heurístico, ruteo de vehículos, tiempo, operación logística.

Cómo citar: Fuentes Vidal, J., Parra León, M. y Gutiérrez, H. A. (2014). Método heurístico para el problema de ruteo de vehículos aplicado a la empresa distribuidora Representaciones Continental. *Gestión & Sociedad*, 7(1), 171-186.

* Artículo resultado de un proceso de investigación en el que se busca establecer la posibilidad de aplicar un modelo heurístico para ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.

** Ingeniero industrial por la Universidad Central, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: stratovarious27@gmail.com

*** Ingeniero industrial por la Universidad Central, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: marcoparraleon@yahoo.com.co

**** Docente investigador de la Facultad de Ciencias Administrativas y Contables de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: hergutierrez@unisalle.edu.co

Heuristic Method for the Vehicle Routing Problem Applied to Distribution Company Representaciones Continental

Abstract

This paper presents the feasibility of applying a heuristic model of insertion for the vehicle routing problem with time windows and heterogeneous fleet of a liquor distribution company. By analyzing the initial data supplied by the company and the results obtained, the purpose is to determine whether the heuristic model improves in terms of time and cost of logistics operation, as well as to validate the application of the heuristic method. Based on the results obtained, the article focuses on claiming how the insertion heuristic applied to the routing problem behaves in an expected and correct manner. Finally, based on the results obtained from the investigation, a few suggestions are made, such as exporting the reading of the customer information and the demands generated each day to a database, investigating with other heuristic models proposed by other authors, developing a new program based on a different heuristics and testing how the programming of these models would behave in other programs.

Keywords

Heuristic method, vehicle routing, time, logistics operation.

Introducción

La logística, como parte de la administración estratégica de procesos para generar un producto terminado y entregado a un cliente, ha sido aplicada por su gran importancia dentro de las organizaciones, incursionando en los problemas del transporte, el comercio y la industria. Es utilizada para la optimización de los *stocks*, la entrega oportuna y los adecuados recorridos de distribución (entrega y retorno de servicios) (Benavente y Bustos, 2005).

La determinación de rutas es una de las operaciones más indispensables y con gran importancia a la hora de la planeación y ejecución de la distribución, debido a que incluye factores como el cumplimiento

a los clientes, la capacidad del medio de transporte, los costos y el nivel de servicio. De una adecuada logística dependen, entre otras cosas, la optimización en los procesos, la inclusión en nuevos mercados, el reconocimiento y la fidelidad de los clientes.

Uno de los problemas en el ámbito de la gestión logística y de la cadena de abastecimientos es el ordenamiento de distribución en el ruteo de vehículos, ya sea para la entrega o recogida de bienes. De ahí parte la necesidad de realizar estudios sobre los métodos que se pueden aplicar para mejorar esta actividad.

Para esto será necesario identificar y analizar el problema del *vehicle routing*

problem (VRP), en el cual se utiliza la investigación de operaciones para formular y definir el modelo que corresponde a cada situación en particular. Adicionalmente, se utilizan heurísticas y metaheurísticas para la solución de problemas combinatorios (problemas NP-Hard) que muy comúnmente se encuentran en el ruteo de vehículos y que, debido a los tiempos de ejecución y al tamaño del problema, no se pueden resolver en tiempo polinomial (Olivera, 2004).

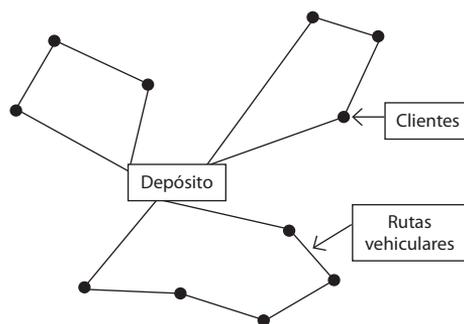
En el estudio de la distribución de productos hacia sus clientes, productos que parten de uno o más depósitos, se sugiere una planeación que busca reducir los costos de transporte, los cuales representan entre el 10% y el 20% de los costos finales y determinan la rutas que deben realizar cada uno de los vehículos disponibles; sin embargo, la mayoría de las empresas aún no implementan métodos logísticos que garanticen buenos resultados, ya que carecen de una buena planificación para la definición de las rutas, lo cual incrementa sus costos operacionales y reduce el número de sus clientes por el tipo de calidad prestada.

Por esta razón es muy importante realizar una serie de investigaciones que permitan a las empresas implementar nuevos métodos para sus operaciones logísticas y que, a la vez, aporten al crecimiento del desarrollo investigativo en este campo (Benavente y Bustos, 2005) (figura 1).

El problema del agente viajero (TSP) se utiliza con el fin de minimizar la distancia de la ruta, la cual visita a todos los clientes exactamente una vez (Hoff y Lokketangen,

2006). El VRP parte del análisis del TSP, el cual es uno de los más analizados y estudiados dentro de la investigación de ruteo de vehículos. Se representa como un conjunto de nodos por ser visitados (clientes) y un conjunto de vehículos inicialmente ubicados en un nodo particular (depósito), con el objetivo de asignar rutas a los vehículos dentro de una secuencia ordenada de nodos (clientes) una sola vez, tendientes a minimizar el costo total de transporte o la distancia total recorrida (Borgulya, 2008).

Figura 1. Modelo VRP



Fuente: Benavente y Bustos (2005).

El VRP considera diferentes restricciones, como son las capacidades de los vehículos, el emparejamiento de las rutas, la reglamentación de los vehículos que pueden circular por cierta zona, las ventanas de tiempo de los clientes y de los proveedores, entre otras (Olivera, 2004).

Para esta aplicación se consideran las restricciones de flota heterogénea y ventanas de tiempo. Se considera *flota heterogénea*

cuando los vehículos utilizados para la distribución o recolección de mercancía tienen diferentes capacidades o los costos de estos son diferentes (Yaman, 2006). Las ventanas de tiempo son lapsos asociados a cada cliente, durante los cuales se debe comenzar la prestación del servicio. Si el vehículo llega antes de la apertura de la ventana de tiempo, este tiene que esperar hasta que se abra para realizar la prestación del servicio (Fu, Eglese y Li, 2007).

A continuación se presenta el modelo matemático para el FSMVRP (Ropke y Pisinger, 2006).

Parámetros

i : representa los nodos de los clientes.

j : representa los nodos de los clientes.

τ : representa el subíndice de inicio de la ruta de los vehículos k (vehículos con características especiales).

τ' : representa el subíndice de finalización de la ruta de los vehículos k (vehículos con características especiales).

K : es el conjunto de todos los vehículos.

P : representa al conjunto de clientes que se les recoge mercancía $\{1, 2, \dots, n\}$.

D : representa al conjunto de clientes que se les entrega mercancía $\{n + 1, \dots, 2n\}$.

K_i : es el conjunto de vehículos que son utilizados para requerimientos especiales.

D_{ij} : es la distancia que hay entre un par de nodos i, j : $d_{ij} > 0$.

T_{ij} : es el tiempo que hay entre un par de nodos i, j : $t_{ij} > 0$.

S_i : es el tiempo de servicio en el cliente i .

$[a_i, b_i]$: es la ventana de tiempo del cliente i .

L_i : es la cantidad de bienes que deben ser cargados del cliente i .

C_k : es la capacidad del vehículo k .

Variables

Para el siguiente modelo se presentan cuatro variables de decisión:

X_{ijk} : es una variable binaria, la cual representa si el vehículo k pasa del nodo i al nodo j ; si es así, toma el valor de 1, de otra manera es 0.

S_{ik} : es un entero no negativo que indica cuando el vehículo k empieza el servicio en el nodo i .

L_{ik} : es una variable entera no negativa que indica la cantidad de mercancía llevada en el vehículo k después de servir el nodo i .

Z_i : es una variable binaria que indica si el requerimiento i está en el banco de requerimientos; si es así, es 1; de otra manera es 0.

$$\text{Min} Z = \alpha \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} d_{ij}^* x_{ijk} + \beta \sum_{k \in K} (S_{\tau',k} - a_{\tau'}) + \gamma \sum_{i \in P} z_i \quad (1)$$

s. a.

$$\sum_{k \in K_i} \sum_{j \in V_k} x_{ijk} + z_i = 1 \quad \forall i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V_k} x_{ijk} - \sum_{j \in V_k} x_{j,n+i,k} = 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in P_k \quad (3)$$

$$\sum_{j \in P_k \cup \{\tau'_k\}} x_{\tau'_k, j, k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum x_{i, \tau'_k, k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V'_k} x_{ijk} - \sum_{i \in V_k} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in N_k \quad (6)$$

$$x_{ijk} = 1 \Rightarrow S_{ik} + s_i + t_{ij} \leq S_{jk} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A_k \quad (7)$$

$$a_i \leq S_{ik} \leq b_i \quad \forall k \in K, \forall i \in V_k \quad (8)$$

$$S_{ik} \leq S_{n+i, k} \quad \forall k \in K, \forall i \in P_k \quad (9)$$

$$x_{ijk} = 1 \Rightarrow L_{ik} + l_j \leq L_{jk} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A_k \quad (10)$$

$$L_{ik} \leq C_k \quad \forall k \in K, \forall i \in V_k \quad (11)$$

$$L_{\tau'_k, k} = L_{\tau'_k, k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A_k \quad (13)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in P \quad (14)$$

$$S_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in V_k \quad (15)$$

$$L_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in V_k \quad (16)$$

La función objetivo (1) minimiza la suma de los ponderada de la distancia recorrida, el tiempo gastado por cada vehículo y el número de requerimientos no programados. La primera restricción (2) se asegura de que cada ubicación de recogida es visitada o que la solicitud correspondiente se coloca en el banco de solicitudes. La segunda restricción (3) asegura que la ubicación de entrega es visitada, si la localización de recogida es visitada y que la visita es realizada por el mismo vehículo. La tercera y cuarta restricciones (4) y (5) aseguran que cada vehículo que entra a

un nodo sale de este. La restricción quinta (6) asegura que hay un camino continuo entre el inicio de la ruta τ y la finalización de la ruta τ' . La sexta (7) y séptima (8) restricciones son un conjunto de caminos que pertenecen a la ruta y aseguran el cumplimiento de las ventanas de tiempo. Estas restricciones evitan que se generen subrutras. La restricción octava (9) asegura que cada recogida debe ocurrir antes de la correspondiente entrega. Las restricciones novena (10), décima (11) y undécima (12) aseguran que la variable de carga está configurada correctamente a lo largo del camino y que es respetada la capacidad de los vehículos. Las últimas restricciones (13-16) definen las variables de decisión.

Para el caso en estudio se realizó una investigación sobre el problema del VRP con ventanas de tiempo y flota heterogénea, por medio de una heurística de inserción que permitió el acercamiento a soluciones óptimas de problemas de ruteo de vehículos, según los datos obtenidos por una empresa distribuidora de licores en la ciudad de Bogotá, limitando su cobertura en una de las veinte localidades que tiene el Distrito Capital.

Debido a los múltiples tipos de problemas en los que se puede aplicar el VRP, y a la complejidad de estos, es necesario determinar las variables y las restricciones propias del problema. En este caso será el problema del ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, teniendo en cuenta los tiempos de entrega del producto a los clientes con ventanas de tiempo temporales flexibles y flota heterogénea. Se encuentra así una heurística que permita trabajar desde dichos parámetros y que,

a la vez, haga posible evaluar si los resultados representan disminución de variables como costos operativos y los tiempos de recorrido en las rutas que maneja la empresa en estudio.

Mediante la aplicación de la heurística de inserción (Solomon, 1987), se busca clarificar si el ruteo de vehículos para la empresa Representaciones Continental en la localidad de Teusaquillo, dentro de la jornada de distribución del producto entre las 2:00 p. m. y 8:00 p. m., puede verse mejorado en su recorrido total, teniendo como resultado la planeación de nuevas rutas que le permitan disminuir sus costos variables de envío, como también los tiempos de recorrido de los vehículos hacia los clientes; cuando el cliente requiera ser visitado más de una vez y por diferentes vehículos, a la vez que tengan restricciones en los horarios de servicio. Por esto es importante identificar el tipo de cliente y el tipo de servicio que se requiera.

Su función objetivo dependerá de las características del problema, que en la mayoría de casos busca minimizar y maximizar las siguientes acciones:

- Minimizar costos totales de operación.
- Minimizar los tiempos de transporte (bodega-clientes-bodega).

- Minimizar las distancias recorridas.
- Minimizar tiempos de espera (ventanas de tiempo).
- Maximizar beneficios.
- Maximizar la calidad del servicio al cliente.

Método

La metodología para llevar a cabo la investigación es la revisión del problema y de una técnica para solucionar el problema que tiene la empresa Representaciones Continental. Posteriormente, se presenta el procedimiento que ellos están utilizando para generar las rutas de entrega. La tercera es la aplicación de la heurística de inserción secuencial de Solomon y, como última, parte el análisis de resultados de la técnica de inserción secuencial contra la forma de realizarlo actualmente.

Método actual

A partir del análisis del método de distribución actual de la empresa Representaciones Continental se puede observar que esta no cuenta con una debida planeación en los métodos logísticos de distribución. En la tabla 1 se presenta el procedimiento mediante el siguiente cursograma analítico:

Tabla 1. Proceso de entrega de pedidos por Representaciones Continental

| Actividad | Operación | Transporte | Inspección | Espera |
|---|-----------|------------|------------|--------|
| Vendedor previamente toma pedidos en las tiendas | | | | |
| Vendedor entrega pedidos a jefe de bodega | | | | |
| Jefe de bodega entrega pedidos a chequeador | | | | |
| Distribución de pedidos para despacho a chequeador (1:00 p. m.) | | | | |
| Chequeador se traslada a pista, donde alista los pedidos | | | | |
| Chequeador alista los pedidos para cada camión | | | | |
| Chequeador verifica que el pedido sea preciso | | | | |
| Se carga el camión | | | | |
| Se espera a que la documentación sea entregada al conductor | | | | |
| Camión inicia la ruta al primer cliente visitado por el vendedor | | | | |
| Auxiliar del camión entrega el pedido en cada tienda | | | | |
| Auxiliar verifica con el cliente el pedido entregado | | | | |
| Cliente firma el documento de recibido y entrega dinero al auxiliar | | | | |
| El camión se traslada de tienda en tienda según recorrido realizado por el vendedor | | | | |
| El camión se dirige a la bodega (8:00 p. m.) | | | | |
| Auxiliar entrega recibos firmados a jefe de bodega | | | | |
| Jefe de bodega verifica que se haya entregado todos los pedidos | | | | |
| Auxiliar entrega dinero y realiza arqueo con jefe de bodega | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Cabe anotar que el ruteo se realiza por medio de las visitas del vendedor; en otras palabras, este actor es el que indica cómo se van a visitar los clientes según la secuencia que él ha realizado en la recopilación de los pedidos. Esto hace pensar que el vendedor está cumpliendo una actividad operativa, sin ningún tipo de aplicación de técnicas cuantitativas,

sino basándose en su experticia. A continuación se muestra una técnica que cumple con las características del sistema de distribución de la empresa Representaciones Continental, teniendo en cuenta los siguientes aspectos: ventanas de tiempo, flota heterogénea, número de clientes conocidos, una sola visita por cliente, entre otros aspectos.

Complejidad computacional

Los problemas de tipo combinatorio cuentan con un procedimiento elemental en la búsqueda de una solución óptima, ya que buscan de manera exhaustiva el mayor número de soluciones, es decir, todas las que sean factibles. Esto quiere decir que estas soluciones cumplen con las restricciones de manera general; sin embargo, este tipo de problemas también tiene limitaciones, como el no poder ser resueltos por programación lineal y entera, ya que el número de relaciones se incrementa y el modelo se estalla antes de dar la solución. Por ello, se requiere que este problema sea abordado por medio de heurísticas o metaheurísticas, que son procedimientos que permiten llegar a una solución, teniendo en cuenta que los primeros generan respuestas menos eficientes que los segundos, pero a su vez se demoran menos en el procesamiento. Para aplicar la heurística, se utilizó un programa para aplicarlo al caso actual, como se muestra a continuación.

Método cuantitativo

A continuación se describe la heurística de inserción secuencial de Solomon, presentando inicialmente el fundamento, que es el algoritmo de ahorros.

El algoritmo de ahorros

Según Olivera (2004), uno de los algoritmos más difundidos para el VRP es el algoritmo de ahorros de Clarke y Wright. Si en una solución dos rutas diferentes $(0, \dots, i, 0)$ y $(0, j, \dots, 0)$ pueden ser combinadas formando una nueva ruta $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$, el ahorro (en distancia) obtenido por dicha unión está dada por (17):

...

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (17)$$

Esto es así porque en la nueva solución, los arcos $(i, 0)$ y $(0, j)$ no serán utilizados y se agregaría el arco (i, j) . En este algoritmo se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den mayores ahorros, siempre y cuando no violen las restricciones del problema. Existe una versión paralela en la que se trabaja sobre todas las rutas simultáneamente, y otra secuencial que construye las rutas de a una cada vez.

Heurísticas de inserción

Las heurísticas de inserción son métodos constructivos en los que se crea una solución mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas. En cada iteración se tiene una solución parcial cuyas rutas solo visitan un subconjunto de los clientes, y se selecciona un cliente no visitado para insertar en dicha solución.

En las heurísticas de inserción secuencial solo se considera insertar clientes en la última ruta creada. La principal desventaja de este enfoque es que los últimos clientes no visitados tienden a estar dispersos y, por tanto, las últimas rutas construidas son de costo muy elevado. Las heurísticas de inserción en paralelo surgen para remediar esta deficiencia, lo cual permite insertar un cliente en cualquiera de las rutas de la solución.

Cualquier heurística de inserción para el TSP puede ser utilizada para el VRP, siempre que se verifique la factibilidad antes de realizar las inserciones.

Heurística de inserción secuencial

Se definirá la heurística de inserción más cercana. Si se tiene una ruta $(0, \dots, V_i, \dots, 0)$, se define el costo de insertar un cliente V_j continuo de V_i en la ruta como:

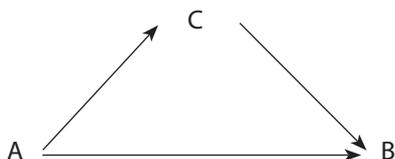
$$\overline{C}_{ij} = \partial_1 * C_{ij} + \partial_2 * T_{ij} + \partial_3 * V_{ij} \quad (18)$$

$$T_{ij} = b_j - (b_i + s_i) \quad (19)$$

$$V_{ij} = \ell_j - (b_j + S_j + t_{ij}) \quad (20)$$

Donde \overline{C}_{ij} es el incremento de insertar un nuevo cliente en la conexión de dos nodos. Este parámetro determina el cliente más apto para insertarse entre un par de nodos que pertenecen a la ruta. En la figura 2 se aprecia el punto c , que es el nodo que se inserta; ahí se calcula el incremento.

Figura 2. Parámetro para insertar el cliente más apto entre un par de nodos



Fuente: elaboración propia.

T_{ij} : indica la diferencia entre el momento del comienzo del servicio en j y la del fin del servicio en i .

V_{ij} : mide la urgencia de realizar la inserción como la diferencia entre el tiempo de arribo a (j) sin incluir la espera y la última hora a la que se podría arribar a dicho cliente.

$\partial_1, \partial_2, \partial_3$: son parámetros expresados en porcentaje, y los tres suman 100 (Catarina, 2004).

Programación del software MySQL

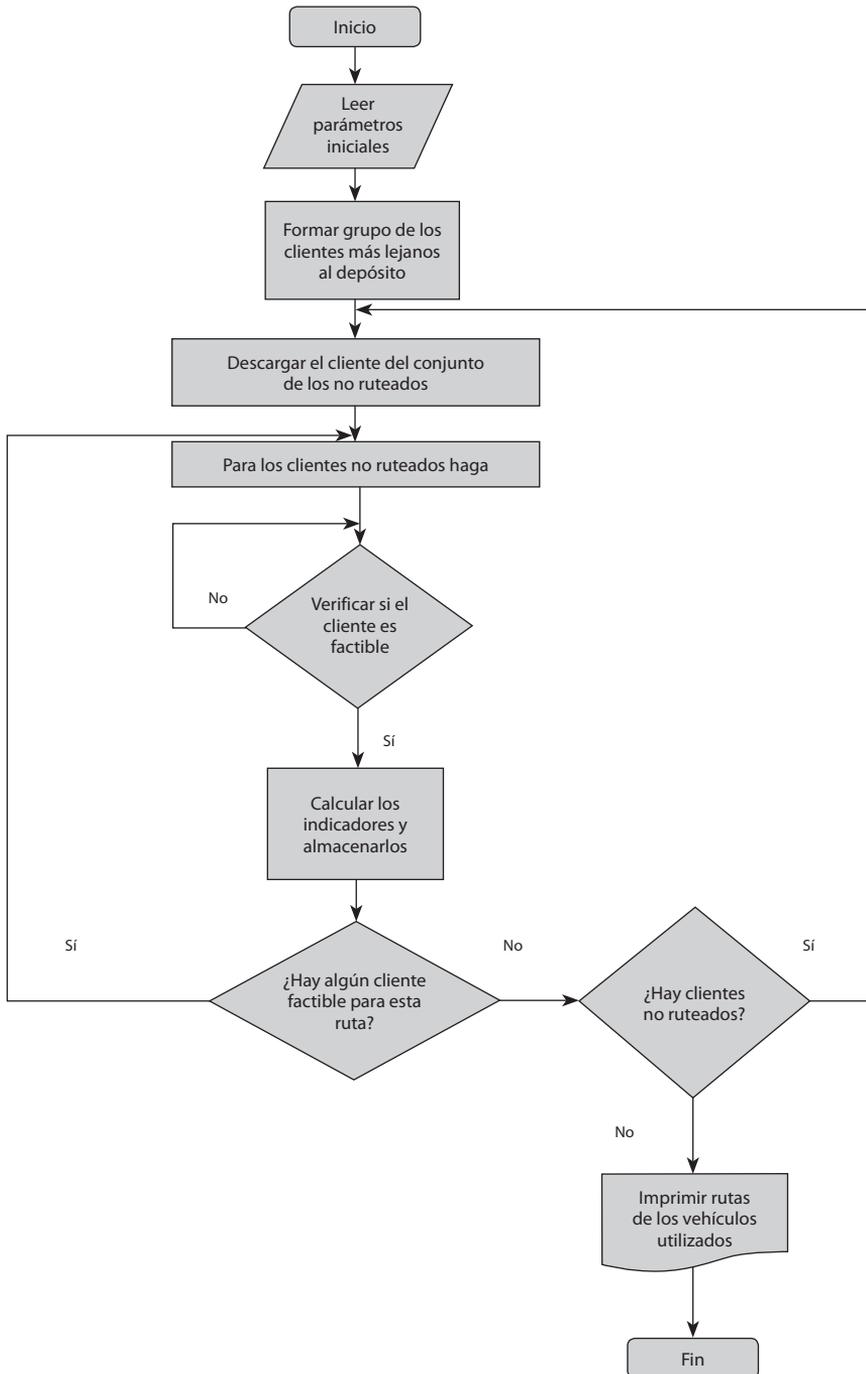
Para la programación computacional se utilizó el software MySQL Administrador, el cual cuenta con las siguientes características:

MySQL es un software de administración de servidores de bases de datos multiplataforma, el cual sirve como herramienta para realizar tareas administrativas y editar sentencias SQL visuales, que además incorpora herramientas para optimizar las consultas. Dispone también de un editor de tablas y registros que permite crear nuevas tablas o cambiar las existentes y brinda la posibilidad de cambiar los registros, es decir, los datos almacenados en las tablas (Web, 2006).

Este algoritmo representa el desarrollo del modelo matemático de la heurística de inserción de Solomon y permite desarrollar la matriz de distancias donde quedarán registrados los datos obtenidos de cada proceso del modelo:

- 1) El programa lee todos los parámetros que contempla el modelo.
- 2) Forma un conjunto de los clientes más lejanos.
- 3) Asigna al cliente más lejano a un vehículo.
- 4) Evalúa todos los clientes no ruteados si son factibles.

Figura 3. Algoritmo programado mediante *software* MySQL



- 5) Si el cliente es factible, determina:
 - a. Calcula C_{ij}
 - b. Calcula T_{ij}
 - c. Calcula V_{ij}
- 6) Si el cliente no es factible, selecciona el siguiente.
- 7) Almacena los datos de C_{ij} , T_{ij} , V_{ij} y calcula la fórmula general realizando la suma y teniendo en cuenta la ponderación, 0,5; 0,25 y 0,25, respectivamente.
- 8) Cuando todo los clientes no ruteados fueron evaluados, se selecciona el cliente con menos fórmula general, y lo inserta.
- 9) Si hay clientes factibles por insertar en la misma ruta, vuelve y evalúa los clientes no ruteados.
- 10) Si no hay clientes factibles, se escoge otro vehículo y otro cliente no ruteado del conjunto I .
- 11) Si todos los clientes fueron ruteados, se imprimen los vehículos y sus rutas, y así finaliza el ruteo.

Propuesta

Con el fin de obtener las distancias entre cada uno de los clientes con respecto a la bodega, se generan, por medio de un mapa de la localidad, los puntos donde están ubicados los nodos de la ruta, y de esta manera se obtiene el cálculo de distancias euclidianas, ubicando cada uno de estos puntos en un plano cartesiano X y Y (las coordenadas X y Y del mapa sirven para el cálculo de las distancias euclidianas).

Propuesta de ruteo mediante heurística de Solomon

A partir del desarrollo de los algoritmos, se procede a ingresar los datos suministrados por la empresa en estudio y, posteriormente, a realizar las respectivas corridas en My SQL, con el fin de determinar si el modelo heurístico de Solomon obtiene cambios y mejoras con respecto a los resultados actuales de la empresa.

Indicadores

Los indicadores que se tuvieron en cuenta en esta investigación fueron la distancia recorrida por ruta, el peso por cargar en el vehículo para la distribución, el tiempo recorrido y el costo total.

Si se observan los resultados obtenidos el día lunes, se puede observar que la distancia entre el recorrido actual y el modelo propuesto disminuye muy poco (tabla 3).

La tabla indica que este fue el día en que menos se logró obtener un ahorro con respecto a la ruta sugerida del programa, con 1 % de ahorro. Este ahorro tan pequeño se debe a que los clientes tienen un orden similar con respecto al modelo sugerido.

En su orden, este fue el segundo día en el que menos se obtuvo ahorro, con un 1,49 % y la misma distribución de productos (tabla 4).

En la tabla 5 se evidencia que el tercer día es cuando menos ahorros obtuvieron, con un promedio del 2,10 %

La tabla 6 representa el día jueves. Sin duda, es el día en el que más incremento

Tabla 2. Coordenadas de distancias euclidianas

| Lunes | | Martes | | Miércoles | | Jueves | | Viernes | |
|-------|-------|--------|-------|-----------|-------|--------|-------|---------|-------|
| Eje X | Eje Y | Eje X | Eje Y | Eje X | Eje Y | Eje X | Eje Y | Eje X | Eje Y |
| 26,4 | 11,4 | 26,7 | 21,2 | 24,1 | 9,4 | 26,0 | 25,4 | 29,2 | 21,7 |
| 26,5 | 12,0 | 26,7 | 21,3 | 24,6 | 9,25 | 26,1 | 25,8 | 28,7 | 21,2 |
| 26,1 | 12,1 | 26,5 | 20,6 | 25,3 | 8,0 | 26,2 | 25,2 | 29,0 | 21,8 |
| 26,1 | 12,5 | 27,6 | 20,5 | 24,6 | 8,45 | 26,2 | 25,3 | 28,5 | 21,9 |
| 26,6 | 12,7 | 27,8 | 20,4 | 24,5 | 7,5 | 26,4 | 25,4 | 28,6 | 21,5 |
| 26,5 | 12,5 | 27,7 | 20,5 | 25,3 | 7,25 | 27,3 | 24,8 | 28,4 | 21,5 |
| 26,8 | 12,8 | 26,5 | 20,6 | 25,4 | 7,25 | 27,2 | 25,1 | 28,0 | 21,9 |
| 26,9 | 13,0 | 27,9 | 20,4 | 25,4 | 8,1 | 27,3 | 25,2 | 28,2 | 22,2 |
| 26,1 | 13,2 | 28,3 | 20,5 | 26,8 | 10,0 | 27,5 | 25,4 | 26,7 | 21,5 |
| 25,8 | 13,3 | 26,8 | 20,4 | 25,5 | 8,5 | 26,2 | 26,0 | 27,4 | 21,7 |
| 25,9 | 13,6 | 26,9 | 20,5 | 25,8 | 8,15 | 29,5 | 24,1 | 27,3 | 21,4 |
| 26,1 | 13,5 | 27,1 | 20,5 | 25,8 | 7,83 | 26,0 | 26,3 | 27,9 | 22,1 |
| 25,7 | 13,1 | 27,0 | 20,6 | 25,6 | 7,9 | 26,7 | 26,5 | 28,0 | 22,5 |
| 25,2 | 12,8 | 27,3 | 20,3 | 26,7 | 7,5 | 27,6 | 25,5 | 28,0 | 21,6 |
| 25,3 | 12,8 | 28,6 | 20,6 | 26,9 | 7,07 | 27,2 | 26,6 | 28,3 | 22,6 |
| 25,6 | 13,0 | 27,0 | 20,4 | 26,9 | 7,2 | 26,6 | 26,6 | 27,6 | 22,2 |
| 25,3 | 13,8 | 27,2 | 20,7 | 27,0 | 7,3 | 27,2 | 26,9 | 26,0 | 22,0 |
| 25,3 | 13,8 | 26,5 | 20,6 | 27,1 | 7,5 | 27,5 | 26,7 | 26,0 | 22,4 |
| 24,6 | 13,2 | 26,6 | 20,5 | 27,1 | 8,85 | 27,1 | 26,8 | 26,4 | 23,0 |
| 25,3 | 13,4 | 26,3 | 19,4 | 27,4 | 9,4 | 27,2 | 28,2 | 25,8 | 22,1 |
| 24,0 | 14,0 | 27,4 | 19,7 | 27,3 | 9,55 | 27,4 | 26,7 | 25,3 | 22,6 |
| 25,5 | 12,7 | 27,6 | 19,6 | 26,7 | 9,65 | 27,5 | 26,8 | 25,6 | 23,3 |
| 23,7 | 14,2 | 28,2 | 19,4 | 27,5 | 9,7 | 28,0 | 26,0 | 24,8 | 24,0 |
| 24,4 | 13,3 | 27,4 | 17,5 | 27,4 | 9,75 | 27,9 | 26,1 | 25,0 | 23,9 |
| 24,0 | 13,3 | 28,0 | 17,8 | 26,6 | 9,66 | 27,6 | 25,8 | 25,0 | 24,3 |
| 24,7 | 13,3 | 28,3 | 17,7 | 26,4 | 9,36 | 28,0 | 26,2 | 25,0 | 24,5 |
| 24,6 | 13,3 | 28,6 | 17,7 | 26,1 | 9,7 | 27,9 | 26,2 | 24,8 | 24,1 |
| 23,9 | 12,8 | 28,6 | 17,6 | 25,9 | 10,6 | 28,0 | 27,7 | 25,4 | 24,1 |
| 24,2 | 12,8 | 28,8 | 18,8 | 26,1 | 10,2 | 27,3 | 27,2 | 25,3 | 24,2 |
| 24,1 | 12,5 | 28,4 | 18,1 | 25,7 | 10,3 | 27,3 | 27,0 | 25,2 | 24,2 |
| 24,5 | 12,8 | 28,0 | 19,0 | 27,2 | 10,7 | 27,9 | 27,8 | 25,2 | 24,6 |
| 24,5 | 14,0 | 28,5 | 20,0 | 27,6 | 10,8 | 27,9 | 27,5 | 25,6 | 25,7 |
| 24,0 | 12,8 | 29,6 | 20,2 | 27,7 | 11,2 | 27,9 | 27,4 | 26,1 | 25,4 |
| 24,5 | 12,5 | 28,7 | 18,5 | 27,4 | 11,3 | 28,1 | 27,6 | 25,9 | 25,2 |
| 24,7 | 12,2 | 28,6 | 19,7 | 27,5 | 11,7 | 28,2 | 27,4 | 25,8 | 25,1 |
| 23,9 | 13,6 | 29,2 | 19,4 | 27,7 | 11,7 | 28,8 | 28,0 | 25,7 | 25,5 |
| 25,5 | 12,6 | 29,3 | 19,4 | 27,3 | 12,0 | 29,0 | 28,2 | 25,8 | 26,6 |
| 24,7 | 12,3 | 29,7 | 19,6 | 27,4 | 12,2 | 30,0 | 24,8 | 26,5 | 25,1 |
| 24,0 | 10,7 | 29,4 | 19,3 | 26,9 | 12,2 | 30,1 | 24,8 | 28,7 | 24,0 |
| 24,5 | 12,5 | 29,4 | 19,9 | 27,3 | 12,3 | 29,7 | 26,5 | 26,1 | 25,1 |
| 24,8 | 11,4 | 27,3 | 17,6 | 27,3 | 12,0 | 30,1 | 26,7 | 26,4 | 23,9 |
| 24,4 | 11,4 | 30,2 | 20,8 | 27,8 | 12,4 | 30,0 | 27,6 | 26,5 | 24,8 |
| 25,7 | 11,3 | 29,9 | 20,8 | 27,6 | 12,3 | | | 26,8 | 24,7 |
| | | 29,2 | 20,2 | 6,5 | 11,7 | | | 26,3 | 24,8 |
| | | 30,2 | 21,2 | | | | | 26,8 | 25,2 |
| | | 30,0 | 21,8 | | | | | 27,2 | 23,7 |
| | | 29,8 | 21,4 | | | | | 25,6 | 23,7 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Primer día de ruteo

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | % de ahorro |
|------------------|---|--|-------------|
| Distancia | 53,0 | 52,301 | 1,23 |
| Peso | 2278,0 | 2278,0 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 79,4 | 78,5 | 1,17 |
| Costo total | 79429,7 | 78451,3 | 1,23 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Segundo día de ruteo

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | % de ahorro |
|------------------|---|--|-------------|
| Distancia | 62,6 | 61,67 | 1,49 |
| Peso | 3238,8 | 3238,80 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 93,9 | 92,51 | 1,48 |
| Costo total | 93899,8 | 92506,60 | 1,48 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Tercer día de ruteo

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | % de ahorro |
|------------------|---|--|-------------|
| Distancia | 44,1 | 43,2 | 2,07 |
| Peso | 1950,0 | 1950,0 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 66,2 | 64,8 | 2,11 |
| Costo total | 66193,1 | 64782 | 2,13 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Cuarto día de ruteo

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | % de ahorro |
|------------------|---|--|-------------|
| Distancia | 63,7 | 55,28 | 13,16 |
| Peso | 1233,0 | 1233,00 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 95,5 | 82,92 | 13,16 |
| Costo total | 95451,6 | 82916,44 | 13,13 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Quinto día de ruteo

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | % de ahorro |
|------------------|---|--|-------------|
| Distancia | 60,0 | 57,03 | 5,00 |
| Peso | 2634,4 | 2634,40 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 90,0 | 85,54 | 5,00 |
| Costo total | 90039,5 | 85543,71 | 4,99 |

Fuente: elaboración propia.

de ahorro se obtuvo, con un promedio de 13,15 %. Vale la pena señalar que este día es cuando más distancia se recorre y cuando menos mercancía se distribuye. Es el día más costoso de toda la semana. La tabla 7 presenta el quinto día de ruteo.

Análisis de resultados

Basado en el modelo que se aplicó para sugerir el nuevo plan de rutas a la empresa de estudio, en la tabla 8 se encuentra el detalle de cada uno de los conceptos evaluados y el porcentaje de ahorro que se logró obtener.

Se consideran cinco rutas correspondientes a cada uno de los días de la semana. Se evidencia que de la variable *distancia* se obtuvo un 4,88 % de ahorro. En la segunda variable se evidencia que el tiempo recorrido se minimizó en un total de 4,9 % (tabla 9).

Finalmente, en el costo total se obtuvo un ahorro del 4,9 %, lo que hace referencia a los costos fijos, costos variables, CIF y todos los costos relacionados para realizar la ruta (tabla 10).

Se evidencia que el día que mejor resultado de ahorro de todas las variables fue el jue-

ves, puesto que ese día se obtuvo 13,13 % de ahorro frente a la ruta actual del mismo día que tiene la empresa en la actualidad.

Mejora

Indudablemente, se obtuvo mejora en cuanto a las variables que se tenía por objeto evaluar y mejorar, como son: distancia, donde se ahorró 4,88 %; tiempo recorrido, con ahorro del 4,90 %; y costo total, con un ahorro del 4,90 %. Estos ahorros se establecen frente al estado actual de ruteo de la empresa Representaciones Continental.

Vale la pena resaltar que el día en que más se obtuvo ahorro en las tres variables fue el jueves, con un promedio del 13 %. Esto se debe a que la unión de puntos de la ruta actual de la empresa estaba muy desordenada y no tenía una secuencia lógica, es decir, podía pasar cuatro veces por dos mismos puntos; caso contrario es el programa, que los organizó de una forma que fueran seguidos y no se repitiera y duplicara la distancia recorrida.

Al aprovechar al máximo este tiempo que se ahorra, se pueden emplear los camiones para recorrer otras rutas; y esto, sumado con otros camiones, constituiría

Tabla 8. Resumen de ruta actual vs. ruta sugerida mediante heurística de Solomon

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | | | | | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | | | | | % de ahorro |
|------------------|---|---------|-----------|---------|---------|--|----------|-----------|---------|----------|-------------|
| | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes | Total |
| Distancia | 53,0 | 62,6 | 44,1 | 63,7 | 60,0 | 52,3 | 61,67 | 43,2 | 55,28 | 57,03 | 4,88 |
| Peso | 2278,0 | 3238,8 | 1950,0 | 1233,0 | 2634,2 | 2278,0 | 3238,80 | 1950,0 | 1233,00 | 2634,20 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 79,4 | 93,9 | 66,2 | 95,5 | 90,0 | 78,5 | 92,51 | 64,8 | 82,92 | 85,54 | 4,90 |
| Costo total | 79429,7 | 93899,8 | 66193,1 | 95451,6 | 90039,5 | 78451,3 | 92506,60 | 64782,0 | 82916,4 | 85543,70 | 4,90 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Día en el que se evidencia más ahorro respecto a los demás

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | % de ahorro |
|------------------|---|--|-------------|
| Distancia | 63,7 | 55,28 | 13,16 |
| Peso | 1233,0 | 1233,00 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 95,5 | 82,92 | 13,16 |
| Costo total | 95451,6 | 82916,44 | 13,13 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Día en el que se evidencia menos ahorro respecto a los demás

| Variables | Ruta actual de Representaciones Continental | Ruta sugerida mediante heurística de Solomon | % de ahorro |
|------------------|---|--|-------------|
| Distancia | 53,0 | 52,3 | 1,23 |
| Peso | 2278,0 | 2278,0 | 0,00 |
| Tiempo recorrido | 79,4 | 78,5 | 1,17 |
| Costo Total | 79429,7 | 78451,3 | 1,23 |

Fuente: elaboración propia.

el ahorro de un camión y distribución de más clientes en un día.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que la heurística de inserción aplicada para el problema de ruteo se comporta de forma esperada y acertada: se obtuvo ahorro total de la semana en

distancia, tiempo recorrido y costo total de 4,88 %, 4,9 % y 4,9 %, respectivamente.

Recorrido por semana, distancia: el lunes se ahorró 1 %; martes, 1,49%; miércoles, 2,07%; jueves, 13,16%; y viernes, 5 %.

Recorrido por semana, tiempo recorrido: el lunes se ahorró 1 %; martes, 1,48%; miércoles, 2,11 %; jueves, 13,16 %; y viernes, 5 %.

Recorrido por semana, costo total: el lunes se ahorró 1%; martes, 1,49%; miércoles, 2,13%; jueves, 13,13%; y viernes, 4,99%.

El día en que más ahorro se obtuvo fue el jueves, con un promedio de 13,15 %, lo cual es muy significativo para la empresa en relación con los costos, que es el parámetro más importante.

Finalmente, puede concluirse que se obtuvo una mejora de resultados frente al ruteo actual de la compañía.

Recomendaciones y trabajos futuros

- Exportar la lectura de la información de los clientes y las demandas generadas cada día a una base de datos, lo que permitirá tener un formato único de información que beneficiará la operatividad del personal encargado del ruteo de la empresa.
- Investigar con otros modelos de heurísticas propuestos por otros autores, los cuales contengan un mayor número de variables y su complejidad sea mayor y, a su vez, tenga utilidad en la vida real.
- Desarrollar un nuevo programa basado en una heurística distinta, a partir del cual se puedan calcular, además de las variables trabajadas en este proyecto, cambios de aceite, consumo de combustible, cambio de llantas, cambio de pastillas de frenos, localización de los restaurantes más cercanos de donde se encuentra el vehículo realizando la distribución, para que sea cómoda el desplazamiento del operario en la hora de almuerzo y no se pierda tiempo.

También incluir un GSP que, además de indicar la ruta apropiada y orientación, indique los siguientes 25 puntos de visita y su respectivo estado.

- Probar cómo se comportaría la programación de estos modelos en otros programas, como C++, por ejemplo, puesto que el programa con el que se trabajó fue MySQL, gracias a la experticia, facilidad y experiencia en el trabajo con este *software*.

Referencias

- Benavente, M. y Bustos, J. (2005). *Estado del arte en el problema de ruteo de vehículos (VRP)*. Temuco: Ediciones Universidad La Frontera.
- Borgulya, I. (2008). An algorithm for the capacitated vehicle routing problem with route balancing. *Central European Journal Operation research*, 16, 331-343.
- Fu, Z., Eglese, R. y Li, L. (2007). A unified tabu search algorithm for vehicle routing problems with soft time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 225(1), 1-11.
- Hoff, A. y Lokketangen, A. (2006). Creating 1-1 solutions for the traveling salesman problem with pickup and delivery by tabu search. *Central European Journal of Operation Research*, 14, 125-140.
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas de vehículos*. Montevideo, Uruguay: Ediciones Universidad de La República.
- Ropke, S. y Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 40, 455-472.
- Solomon (1987). *Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints*. Atlanta: HAM editors.
- Yaman, H. (2006). Formulations and valid inequalities for the heterogeneous vehicle routing problem. *Bilkent University*, 106, 365-390.