

Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte

ELVER A. BERMEO MUÑOZ*
JAIME HERNÁN CALDERÓN SOTERO**



Laboratorio de LOGYCA-GS1 Bogotá, 2008

* Facultad de Ingeniería. Departamento de Sistemas de Producción. Universidad Autónoma de Occidente. ebermeo@uao.edu.co

** Integrante del Grupo de Investigación en Competitividad y Productividad Empresarial GICPE. Universidad Autónoma de Occidente. jhcalderon@uao.edu.co

Resumen

En la actualidad las ciudades se componen de una serie de redes logísticas que estructuran una entidad compacta y compleja, cuya optimización juega un rol de gran importancia frente a la sostenibilidad del sistema. En la actualidad existen varios métodos para la optimización de redes logísticas centradas en el transporte urbano de personas y mercancías: TSP (Traveling salesman problem), CPP (Chinese postman problem) y finalmente el VRP (Vehicle routing problem). Cada uno de ellos permite diseñar rutas de transporte para varios vehículos, que visiten varios puntos específicos, y para entregas que se encuentran dispersas geográficamente. Sus características más importantes son la posibilidad de conocer con anticipación el tipo de vehículo a utilizar, sus dimensiones, peso máximo a cargar, topología de las cajas, horario de atención a cada uno de los clientes, etc. La metodología (VRP) es poco usada por los operadores logísticos en el país, quienes utilizan su experticia para programar cada una de las entregas de sus vehículos a los clientes; debido a esto se presentan errores en el desarrollo de las rutas que afectan el servicio prestado. Uno de estos casos es la programación excesiva de la capacidad de los camiones (sobrepeso) la cual no permite que se realicen todas las entregas a tiempo.

Palabras clave: Investigación de operaciones, logística, transporte.

Abstract

At present the cities are made up of a series of logistics nets that structure a compact and complex organization, where their optimi-

zation plays a very important role in the sustainability of the system. At present several methods for the optimization of centered logistics nets in urban transport of people and merchandise: TSP (Traveling Salesman problem), CPP (Chinese postman problem) and finally the VRP (Vehicle routing problem). Each one of them allows designing routes of several vehicles that visit several specific points which are dispersed geographically and some benefits are: the possibility of knowing with anticipation the type of vehicle to use, their dimensions, maximum weight to load, topology of the boxes, schedule of attention to each one of the clients, etc. VRP methodology is seldom used by the logistic operators in the country, who use their experience to program each one of the visits of the trucks to the clients, due to this, errors appear in the development of the routes that affect service, one of them is the excessive programming of the capacity of the trucks (Overweight) which does not allow that all the deliveries are on time.

Key words: Operations research, Logistics, Transport.

Introducción

El sistema de transporte es el componente más importante para la mayoría de las organizaciones, debido a que el éxito de una cadena de abastecimiento está estrechamente relacionado con su diseño y uso adecuados.

El transporte es el responsable de mover los productos terminados, materias primas e insumos, entre empresas y clientes que se encuentran dispersos geográficamente, y agrega valor a los productos trans-

portados cuando estos son entregados a tiempo, sin daños y en las cantidades requeridas. Igualmente el transporte es uno de los puntos clave en la satisfacción del cliente. Sin embargo, es uno de los costos logísticos más elevados y constituye una proporción representativa de los precios de los productos. Los costos asociados con el transporte son altamente representativos en la cadena de abastecimiento y están involucrados directamente con la relación que se tiene con proveedores, clientes y competidores.

En Colombia (Acosta de Valencia, 2004): “El transporte de carga es una actividad fundamental en el aparato productivo colombiano ya que es el sector que permite que un producto llegue al consumidor final, genere la circulación de bienes y dinamice la economía”. Así mismo dice el autor que “Se debe resaltar la importancia del transporte de carga por carretera, no sólo en cuanto a la carga que se transporta en el territorio nacional, sino también en lo relativo a la competitividad de nuestras exportaciones. El sistema de transporte debe integrar las principales zonas de producción y de consumo del país, y por lo tanto, la demanda y los costos de transporte juegan un papel determinante en el precio final de los bienes”.

También se debe tener en cuenta que entre los diferentes modos de transporte de carga, en Colombia resulta particularmente importante la movilización por carretera. Por este medio se transporta alrededor del 80% de la carga del país. Adicionalmente, los costos del transporte son altamente representativos en la cadena de abastecimiento (se ha observado que el movimiento de carga equivale a 1/3 y 2/3 de los costos totales de logística).

Debido a lo anterior, para una administración efectiva del sistema de transporte es necesaria la

utilización de un sistema de asignación de rutas (VRP), enfocado a la optimización del proceso de distribución de personas y mercancías cuyo objetivo principal es minimizar tiempos y costos en el proceso de entrega y recogida y en general los costos totales de toda organización, agregando valor al producto a entregar.

Además, mediante la administración de un sistema de transporte eficiente y de bajo costo las organizaciones pueden obtener un aumento en la competitividad, en las economías de escala y una reducción los precios de los productos.

Ahora bien, teniendo en cuenta lo mencionado, la motivación principal para la realización del proyecto “Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte” fue el fomentar el uso de herramientas logísticas para optimización de procesos y operaciones, mediante el uso de técnicas y métodos que encuentren una solución adecuada a los problemas complejos como, por ejemplo, la asignación de vehículos a una ruta de transporte.

Este proyecto de iniciación fue realizado por los estudiantes: Jaime Hernán Calderón Sotero, Yury Shirley Rodríguez y Adriana María Molano, de la Universidad Autónoma de Occidente; dirigido por el ingeniero Elver Alfonso Bermeo Muñoz, Director del GICPE, y asesorados por el ingeniero Giovanni Arias docente de la Universidad Autónoma de Occidente

Definición VRP (Vehicle Routing Problem)

El problema del asignación de rutas (VRP) es el nombre dado a todas las clases de problemas en donde un conjunto de rutas para una serie de vehículos tienen como origen uno o varios depósitos que se encuentran ubicados geográficamente, y deben atender un número

de clientes o ciudades. El objetivo del VRP es minimizar el costo de las rutas, que inician y terminan en un depósito, para un conjunto de clientes con demandas conocidas.

El VRP es un problema combinatorio cuyo campo de juego son las fronteras de un grafo $G(V,E)$. La notación utilizada para este problema es la siguiente:

- Sea $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ un conjunto de vértices en donde:
 - Se considera un depósito ubicado en v_0 .
 - Sea $V' = V \setminus \{v_0\}$ como el conjunto de ciudades.
- $A = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V; i \neq j\}$ como un conjunto de arcos
- C es una matriz no negativa de costos o distancias C_{ij} entre los clientes v_i y v_j .
- D es un vector de las demandas de los clientes.
- R_i es la ruta para los i vehículos.
- m es el número de vehículos (Todos idénticos). Una ruta es asignada a cada vehículo.

Cuando $C_{ij} = C_{ji}$ para todos los (v_i, v_j) se dice que el problema es simétrico y es común reemplazar los arcos A con un conjunto de frontera $E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V; i < j\}$.

Con cada vértice en V' es asociado una cantidad q_i de algunos artículos que serán entregados por el vehículo. Adicionalmente el VRP consiste en determinar un conjunto de m rutas vehiculares con un mínimo costo, que empiezan y terminan en un depósito tal, que cada vértice en V' es visitado una vez por uno solo vehículo.

Para un fácil cómputo, puede ser definido $b(V) = \left\lceil \left(\sum_{i \in V'} d_i \right) / C \right\rceil$ como un límite inferior obvio en un número de camiones necesitados para servir los clientes en el conjunto V .

También se considera un tiempo de servicio δ_i (Tiempo necesario para descargar todos los artículos), requerido por un vehículo para descargar la cantidad q_i en v_i . Se requiere que la duración total de la ruta de cualquier vehículo (tiempos de servicio adicionales) no sobrepase el límite dado D , así que, en este contexto el costo C_{ij} se toma como el tiempo de transporte entre ciudades. Una solución factible está compuesta por:

- Una partición R_1, \dots, R_m de V ;
- Una permutación σ_i de $R_i \cup 0$ Especificando el orden de los clientes en la ruta i .

El costo de una ruta dada $(R_i = \{v_0, v_p, \dots, v_{m+1}\})$, donde $v_i \in V$ y $v_0 = v_{m+1} = 0$ (0 denota al depósito), es dada por:

$$C(R_i) = \sum_{i=0}^m c_{i,i+1} + \sum_{i=1}^m \delta_i.$$

Una ruta R_i es factible si las paradas del vehículo son exactamente una en cada cliente y la duración total de la ruta no exceda el límite especificado D : $C(R_i) \leq D$.

Finalmente, El costo de la solución del problema S es:

$$F_{VRP}(S) = \sum_{i=1}^m C(R_i).$$

Los diferentes tipos de problemas VRP disponibles se encuentran descritos en la Tabla 1.

Metodologías de solución para sistemas vrp

Para solucionar los diferentes tipos de VRP ilustrados en la Tabla 1, se utilizan las siguientes técnicas:

Métodos de aproximación exacta

Ramificación y acotamiento (Branch and Bound)

El algoritmo de ramificación y acotamiento (branch and bound) pertenece a una variedad de estrategias de partición para resolver mo-

Tabla 1: Tipos de problemas de asignación de rutas a vehículos

Tipo de VRP	Objetivo	Formulación
Capacitado	Minimizar la flota de vehículos y la suma total del tiempo de transporte, y la demanda total de artículos para una flota mixta de vehículos de entrega con una capacidad uniforme que debe atender una demanda de clientes conocida para un solo artículo, con un mismo depósito y un costo de transporte mínimo.	$Q = \text{Capacidad del vehículo}$ Demanda total de la ruta = $Q : \sum_{i=1}^m d_i \leq Q$
Multidepósito	Minimizar la flota de vehículos, la suma total del tiempo de transporte, y la demanda total de artículos que deben ser entregados desde varios depósitos.	Se denotan el conjunto de depósitos como: $V_0 = \{v_{01}, \dots, v_{0d}\}$ Una ruta i es definida por $R_i = \{d, v_1, \dots, v_m, d\}$, con $d \in V_0$.
Periódico	Minimizar la flota de vehículos y la suma total del tiempo de transporte necesario para suplir todos los clientes. La planeación se hace para determinado periodo.	Cada cliente en el PVRP debe ser visitado k veces, donde $1 \leq k \leq M$. En el modelo clásico del PVRP, La demanda Diaria de un cliente siempre es fija.
Estocástico	Minimizar la flota de vehículos y la suma total del tiempo de transporte necesario para atender a todos los clientes en cada recorrido, se consideran aleatorios sus demandas, tiempo de servicio y/o transporte.	Clientes estocásticos: cada cliente v_i esta presente con una probabilidad p_i y esta ausente $1-p_i$. Demandas estocásticas: La demanda d_i de cada cliente es aleatoriamente variable. Tiempos estocásticos: Los tiempos de servicio δ_i y los tiempos de transporte t_{ij} son aleatoriamente variables.
Backhauls (Retornos fuera de ruta)	El objetivo es encontrar un conjunto de rutas que minimice la distancia total transportada, los clientes pueden demandar o regresar algunos artículos. Así que se debe tener en cuenta que el vehículo no sobrepase su capacidad.	El costo de cada ruta es como en el caso de VRP, con restricciones adicionales. Una ruta es factible si solamente es de entrega, recogida y/o carga.
Entrega y Reparto	Minimizar la flota de vehículos y la suma total del tiempo de transporte, con la restricción de que cada vehículo debe tener la capacidad suficiente para transportar artículos que vayan a ser repartidos y unos de ellos recogidos en los clientes para regresarlos al deposito.	Dada una ruta $R_i = \{v_0, v_1, \dots, v_m + 1\}$ y el vehículo asignado con una capacidad C donde: $C_p(v_k) \leq C$ y $C_d(v_{k+1}) > C$; $C_d(v_k)$ es la cantidad total de artículos entregados a todos los clientes del a todos los clientes del camino de una ruta que empieza en v_0 (deposito) y que terminan en v_k : $C_d(v_k) = \sum_{v_i \in P(1, v_k)} d_i$. $P(1, v_k)$ denota los clientes junto al camino desde el deposito hasta v_k . $C_d(v_k) = \sum_{v_i \in P(1, v_k)} d_i$, Incluyendo a este cliente.
Ventanas de tiempo	Minimizar la flota de vehículos, la suma total del tiempo de transporte y el tiempo de espera necesitado para atender los clientes en una hora determinada.	Una ruta será factible si $e_{0i} \leq b_{0i} \leq l_{0i}, 1 \leq i \leq m$ y $b_{0m} + \delta_{0m} + c_{0m,0} \leq l_0$ El costo de la ruta esta dado por $C_{VRPTW} = \sum_{i=0}^m c_{i,i+1} + \sum_{i=0}^m \delta_i + \sum_{i=0}^m w_{0i}$

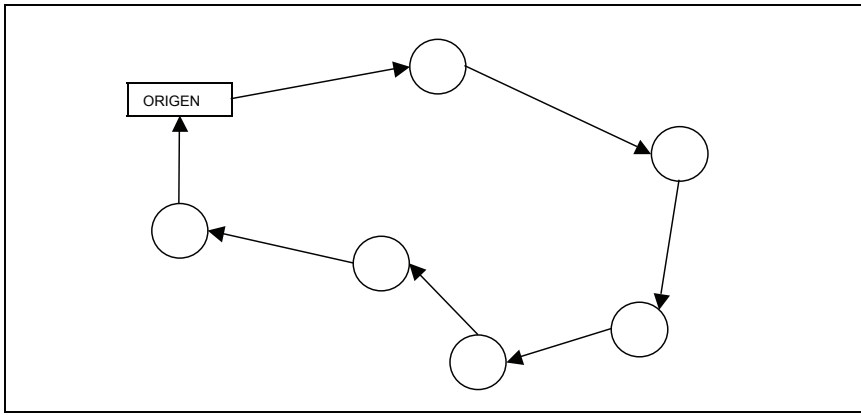


Figura 1. Solución de un sistema TSP para seis ciudades

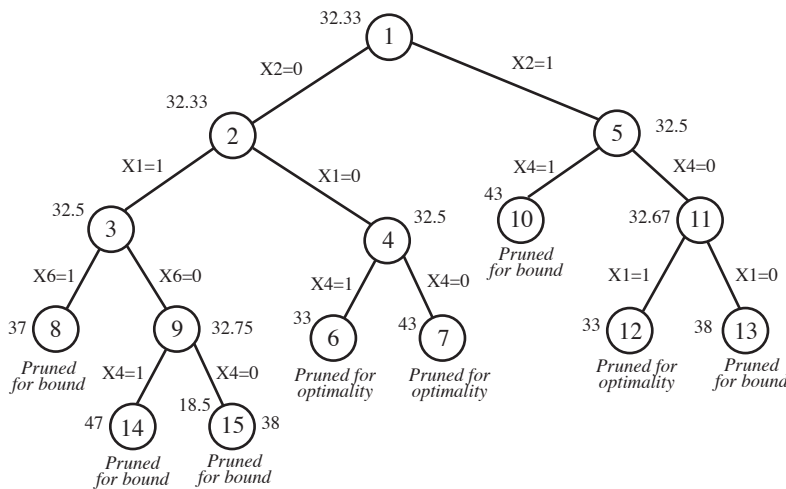


Figura 2. Método utilizado por el algoritmo de ramificación y acotamiento

Fuente: Kunthal, Samantha. Tabu Search for Pure 0-1 Integer Programs. [en línea] Universidad de Buffalo, Buffalo: New York. [consultado el 2 de Marzo 2004] Disponible en web: <http://www.eng.buffalo.edu/~ksamanta/projects/index.html.>

delos de optimización global. Este algoritmo se encarga de mantener un límite inferior y superior (global) del valor óptimo de la función objetivo. Sin embargo, puede ser lento y el esfuerzo crece exponencialmente con el tamaño del problema.

El problema se divide en dos procesos: En el proceso de ramificación tendremos en las ramas finales del árbol, todas las soluciones factibles enteras del problema original. Sin embargo, un nodo del árbol puede no requerir más ramificaciones, en cuyo caso se dice que se acota (poda) esa rama. Esto ocurre porque el problema en el nodo es infactible por lo que todos los subproblemas generados a partir de él serán infactibles también (Ver Figura 3).

Ramificación y corte (Branch and cut)

El algoritmo de ramificación y corte es una generalización del algoritmo de ramificación y acotamiento (branch and bound); emplea una combinación de planos de corte y enumeración implícita para resolver problemas. La idea básica es encontrar las restricciones vulneradas (Ver Figura 3).

Métodos heurísticos

Realizan una exploración limitada en el espacio de soluciones. Producen soluciones razonablemente buenas con tiempos de computación modestos. A su vez se clasifican en:

Construcción: Crea de forma gradual una solución factible a la vez que trata de minimizar el cosoe, pero de por sí no tiene una fase de mejora.

Modelo de los ahorros (Savings Criterion – Clarke and Wright 1958)

El algoritmo del ahorro de Clarke and Wright es una de las heurísticas VRP más conocidas. Este

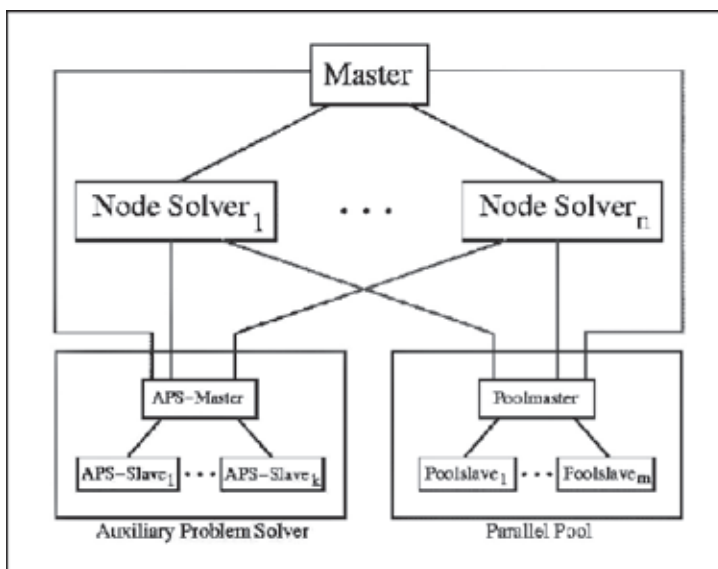


Figura 3. Método utilizado por el algoritmo de ramificación y corte

Fuente: Jünger M. and Störmer P. Solving large-scale traveling salesman problems with parallel Branch-and-Cut.[en línea] Universität Passau, Frankfurt: Alemania [consultado el 2 de Marzo 2004] disponible en web: <http://www.informatik.uni-koeln.de/oldls_juenger/staff/stoermer.html>

modelo se aplica a problemas en los cuales el número de vehículos no es fijo, y funciona adecuadamente para problemas directos e indirectos. Cuando dos rutas $(0, \dots, i, 0)$ y $(0, j, \dots, 0)$ pueden ser fusionados en una sola ruta $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$, una distancia de ahorro es generada $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$. Esta metodología se divide en tres fases (Ver Figura 4):

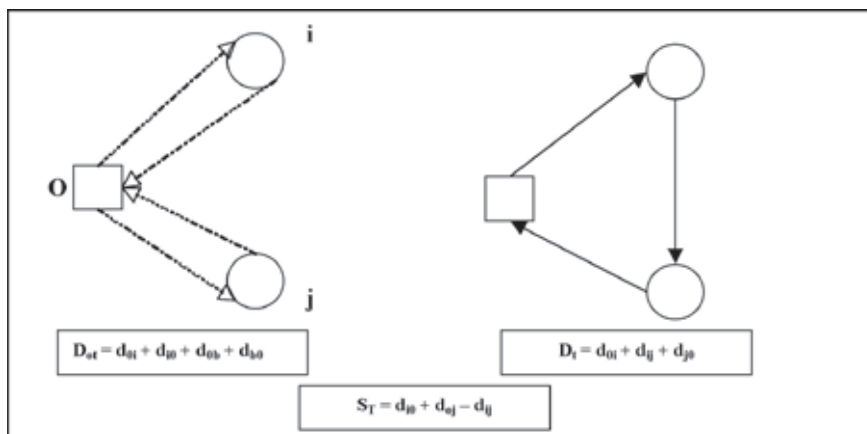


Figura 4. Modelo de los ahorros - Clarke and Wright

Fase I: Cálculo del ahorro

1. Calcule el ahorro $\delta_{ij} = c_{io} + c_{oj} - c_{ij}$ para i, j, \dots, n y $i \neq j$.
2. Cree n rutas vehiculares $(0, i, 0)$ Para $i = 1, \dots, n$.
3. Ordene las rutas sin aumentar el ahorro.

Fase II: La mejor fusión factible

Empezando del encabezado de la lista de los ahorros, ejecute lo siguiente:

Dado un ahorro δ_{ij} , determine cuál de las dos rutas existentes pueden ser fusionadas factiblemente:

- Una que empiece con $(0, j)$
- Una que termine con $(i, 0)$

Combine estas dos rutas borrando $(0, j)$ y $(0, i)$ e introduciendo (i, j) .

Fase III: Versión secuencial

Considere la ruta $(0, i, \dots, j, 0)$

Determine el primer ahorro δ_{ki} o δ_{kl} que puede ser factible para fusionar la ruta actual con otra ruta que termine con $(k, 0)$ y empiece $(0, l)$

Luego, se implementa la fusión y se repite esta operación para la ruta actual. Si no existen más fusiones factibles, considera una nueva ruta y aplica las operaciones realizadas anteriormente. El proceso se detiene cuando no se encuentran rutas para fusionar que sean factibles.

Con respecto al cálculo del “ahorro”, este se hace para todos los pares de clientes, seleccionando el que presenta mayor ahorro y que sea factible. Igualmente hay que satisfacer todas las restricciones del caso, tales como ventanas de tiempo, capacidad del vehículo, entre otras restricciones.

Finalmente, el conjunto de rutas se revisa y el proceso de cálculo de ahorros continúa hasta no tenerlos. Así mismo, los ahorros también pueden ser estimados considerando la incorporación de clientes en rutas con varios clientes.

Métodos meta heurísticos

Son métodos que realizan una exploración intensiva del espacio de soluciones. La calidad de las soluciones de estos métodos es mucho mayor que la obtenida por los heurísticos clásicos. A continuación se describirán algunos de estos:

Ant colony (Colonia de hormigas): Esta meta heurístico utiliza una sola colonia de hormigas para minimizar simultáneamente las tres funciones objetivo: el número de vehículos utilizados, la distancia total recorrida y el tiempo total de entrega. Todas las funciones comparten los mismos rastros de feromonas. De esta manera, el conocimiento de buenas soluciones es igualmente importante para cada función objetivo.

Búsqueda tabú (Tabú search):

La búsqueda tabú es un procedimiento o estrategia dado a conocer en los trabajos de Glover (1998 y 1990), y está teniendo grandes éxitos y mucha aceptación en los últimos años. Es un procedimiento que explora el espacio de soluciones más allá del óptimo local. Se permiten cambios hacia arriba o que empeoran la solución, una vez que se llega a un óptimo local. Simultáneamente los últimos movimientos se califican como tabús durante las siguientes iteraciones para evitar que se vuelva a soluciones anteriores y el algoritmo cicle. El término tabú hace referencia a un tipo de inhibición a algo, debido a connotaciones culturales o históricas y que puede ser superado en determinadas condiciones.

Algoritmos genéticos: Los algoritmos genéticos son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a estos los mismos métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación. En un algoritmo genético, tras parametrizar el problema en una serie de variables, (x_1, \dots, x_n) se codifican en un cromosoma. Las soluciones codificadas en un cromosoma compiten para ver cuál constituye la mejor solución (aunque no necesariamente la mejor de todas las soluciones posibles).

Metodología**Utilizando un sistema VRP**

En el mercado actual altamente competitivo, la presión del costo y los requerimientos de servicio conducen a la necesidad de tener una estrategia sólida de administración de activos, automatización de procesos, operaciones de enrutamiento y transporte, siendo esta última una importante decisión operacional

relacionada con toda la cadena de abastecimiento.

En la operación diaria del transporte es necesario decidir cuáles clientes visitar con un vehículo, los puntos de entrega, las capacidades de los vehículos y la secuencia de cada una de las visitas, con el fin de obtener menores costos y cumplir con un nivel de servicio dado.

Debido a la complejidad de los problemas en la operación del transporte, existe un efecto combinado de variabilidad, incertidumbre, dinámica y complejas interdependencias entre los elementos del sistema.

La mayor parte de empresas transportadoras y operadores logísticos realizan la planeación de la operación de una manera empírica, basados en la experiencia de su personal, y en muchos casos generan sobrecostos por la no utilización de un modelo que optimice la distribución y el transporte.

Debido a lo anterior, y mediante este proyecto, se quería que con la utilización de un sistema VRP, la organización seleccionada diera respuesta a sus problemas en la planeación de la operación del transporte mediante la utilización de técnicas y herramientas (cuantitativas) que le permitieran plantear un modelo que pudieran utilizar sin importar los cambios que presenten las variables analizadas en el tiempo.

Para alcanzarlo se escogió una empresa transportadora representativa que manejara un volumen considerable de carga en la región del Valle del Cauca.

A continuación se describirán cada una de las fases realizadas para la aplicación de este modelo.

Fase I: Aprendizaje

Antes de iniciar cualquier proceso de adaptación e implementación VRP, era necesario que el

equipo investigador comprendiera esta metodología, sus alcances, utilización y conceptualización. Como referencia para adentrarse en la conceptualización del VRP se analizaron alrededor de ocho papers, de los cuales se destacan:

1. Un problema híbrido de dos etapas de búsqueda local para ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.
2. Flexibilidad en la programación y maximización de la contribución en problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.
3. Método de descomposición de redes que identifica la estrategia óptima de transporte (1981)

Después de analizar esta documentación se estableció que eran necesarios dos factores fundamentales para un sistema VRP: una metodología matemática y una metodología informática.

La metodología matemática buscaba que la situación real pudiera ser modelada en un sistema de ecuaciones, utilizando la ya conocida programación lineal. Este sistema se encuentra compuesto principalmente por una función objetivo que busca minimizar los costos de transporte o la distancia recorrida. Luego, se definen una serie de restricciones matemáticas que buscan adaptar la formulación del problema a las diferentes situaciones particulares del sistema del transporte como la capacidad del vehículo, velocidad, números de clientes a atender, horario de salida y regreso de los vehículos al depósito central, etc.

Igualmente, las restricciones permiten regular los diferentes escenarios del problema, como por ejemplo que la capacidad y el volumen disponibles en los vehículos no se sobrepase.

En tanto la estructura matemática es utilizada para modelar el sistema de transporte inicial, la metodología informática depende de la complejidad del sistema. Esta encontrará una solución óptima mediante herramientas de programación. Todas las soluciones a un sistema VRP son aproximadas, hasta la fecha no ha sido posible encontrar una solución 100% cercana al óptimo, lo máximo ha sido un 98%.

Entonces, el grupo de investigadores analizó los siguientes modelos:

1. Un problema híbrido de dos etapas de búsqueda local para ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.

Función objetivo: Minimiza los costos de transporte, con pocas rutas y altos costos de transporte.

Heurística utilizada: Simulated Annealing.

Este modelo de ruteo está dividido en dos etapas fundamentales: Minimizar el número de rutas, como primera fase y minimizar el costo de transporte, como segunda fase.

Estas dos etapas son utilizadas debido a que si se centra solo en el costo de transporte puede hacer que se dificulte la solución al modelo, dando como resultado menos rutas y esto puede obligar a degradar considerablemente la función objetivo.

En la primera fase, minimización de rutas, se utiliza una vecindad grande o neighborhood, grande, es decir una agrupación de clientes de un sector, y los reubica de tal manera que los clientes de rutas pequeñas se ubiquen en una ruta grande, mientras las violaciones a las ventanas de tiempo y retrasos al plan de ruteo original sean mínimos.

En la segunda fase se evalúa el costo de ubicar el cliente en la nueva vecindad y se hacen n pruebas en

las que se minimiza el costo total de la ruta.

Formulación matemática

Función objetivo

$$f(\sigma) = \langle |\sigma|, \sum_{r \in \sigma} t(r) \rangle$$

Donde $\sigma =$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bigcup_{i=j}^m \text{cust}(r_i) = \text{Customers} \\ \text{cust}(r_i) \cap \text{cust}(r_j) = \emptyset \ (1 \leq i < j \leq m) \\ \text{Y su tamaño es } \{ |r \in \sigma | \text{cust}(r) \neq \emptyset \} \\ \text{y } t(r) = c_{0v2} + c_{v1v2} + \dots + c_{v1-mn} + c_{vn0} \end{array} \right.$$

Es el costo total de visitar todos los clientes de una ruta r .

Restricciones

Capacidad

$$q(r_j) \leq Q \ (1 \leq j \leq m);$$

Donde,

$$q(r) = \sum_{c \in \text{cust}(r)} q_c$$

La sumatoria de la demanda de cada cliente de una ruta no excede la capacidad del camión¹.

$q_i \geq 0$ La demanda de cada cliente i es mayor que cero

Ventanas de tiempo

$$a(r_j) \leq l_0 \ (1 \leq j \leq m)$$

El límite inferior de la ventana de tiempo de una ruta debe ser inferior al límite superior de la misma ventana.

$$a_i \leq l_i \ (i \in \text{customers})$$

El límite inferior de la ventana de tiempo de un cliente i debe ser inferior al límite superior de la misma ventana.

$$s_i \geq 0$$

El tiempo de servicio de un cliente i debe ser mayor que cero.

El tiempo de salida a un cliente i está dado por:

$$\delta 0 = 0$$

$$\delta i = \max(\delta i - + c_{i-1}, e_i)$$

$$+ s_s \ (i \in \text{customers})$$

El tiempo de servicio más temprano i , denotado por a_i , es definido como

$$a_i = \max \ (\delta_i + c_{i-1}, e_i) \ (i \in \text{customers})$$

Y el tiempo tardío para un cliente i , el cual no viola las restricciones de las ventanas de tiempo de i en esa ruta, denotada por z_i , está definida recursivamente como:

$$z_0 = l_0$$

$$z_i = \min(z_i + -c_{ii} + -s_i, l_i)$$

$$(i \in \text{customers})$$

Costos

Los costos de transporte satisfacen la siguiente inecuación triangular:

$$c_{ij} + c_{jk} \geq c_{ik}$$

El costo normalizado de transporte es $c_{ij} = \frac{c_{ij}}{\max_{i,j \in \text{sitios}} c_{ij}}$

2. *Flexibilidad en la programación y maximización de la contribución en problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.*[9]

Características generales

Función objetivo: Maximizar la utilidad recibida del transporte, por ahorros de tiempo y evitando las penalizaciones por llegadas tardías.

Heurística utilizada: Generalized savings criterion, Generalized Regret criterion, y insertion Heuristic.

La maximización de la contribución en un problema de ruteo de

¹ Los camiones son idénticos; tienen igual capacidad.

vehículos con ventanas de tiempo (CMVRPTW) en donde la capacidad de los vehículos ubicados en un depósito es requerida por el esparcimiento geográfico de los clientes en una región dada, dentro de un periodo específico de programación.

Las bondades de este modelo es que puede ser usado para estudiar un número de combinaciones de precios y para la distribución de la programación

El modelo se apoya en la flexibilización de la programación, en donde se aprovecha el cumplimiento del horario asignado por los clientes a un vehículo. Los transportadores de carga pueden utilizar esta flexibilidad para reducir los costos de operación diseñando rutas más eficientes.

Una de las principales características de este modelo es que a un vehículo se le permite llegar tarde a una entrega, y cuando esto sucede incurre en una penalización económica.

Formulación matemática

Función objetivo

$$\begin{aligned} \max \sum_{w \in W^j} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^k} (p(q_j, w) - c_{ijk}^w) X_{ijk}^w \\ - \sum_{k \in K} \sum_{j \in V^k} c_f^k X_{ojk}^w \end{aligned} \quad (2)$$

Restricciones

Sujeto a

$$\sum_{w \in W^j} \sum_{k \in K} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} X_{ijk}^w = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

La restricción 3 asegura que cada cliente j sea servido exactamente una vez en una de las ventanas de tiempo permitidas por un vehículo en particular.

$$\sum_{w \in W^j} \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} X_{o(k),j,k}^w \leq v \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{w \in W^j} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} X_{o(k),j,k}^w \\ = 1 \quad \forall k \in K \end{aligned} \quad (5)$$

En donde todos los vehículos pueden partir de su ubicación original $o(k)$, y transportarse a uno de los clientes $j \in N$ o a su destinación $d(k)$ (5).

$$\begin{aligned} \sum_{w \in W^j} \sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} X_{i,j,k}^w \\ - \sum_{w \in W^i} \sum_{i \in N \cup \{d(k)\}} X_{j,i,k}^w \\ = 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in N \end{aligned} \quad (6)$$

Después de realizar un servicio, cada vehículo puede partir al cliente (6)

$$\begin{aligned} \sum_{w \in W^{d(k)}} \sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} X_{i,d(k),k}^w \\ = 1 \quad \forall k \in K \end{aligned} \quad (7)$$

y finalmente tiene que arribar a su ubicación destino $d(k)$ (7).

La factibilidad del tiempo de programación es garantizada por las restricciones 8 y 9

$$\begin{aligned} X_{ijk}^{wj} (b_i + s_i + t_{ij} - b_j^w) \leq 0 \\ \forall k \in K, \forall w \in W^j, \forall (i,j) \in A^k \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} e_{jw} \leq b_j^w \leq l_{jw} \\ \forall k \in K, \forall w \in W^j, \forall j \in V^k \end{aligned} \quad (9)$$

Las restricciones 10 a 12 aseguran la factibilidad de la carga

$$\begin{aligned} X_{ijk}^{wj} (Q_{ik} + q_j - Q_{jk}) \leq 0 \\ \forall k \in K, \forall w \in W^j, \forall (i,j) \in A^k \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} q_j \leq Q_{jk} \leq C^k \\ \forall k \in K, \forall j \in N \cup \{d(k)\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$Q_{o(k)}^k = q_o(k) \quad \forall k \in K \quad (12)$$

y las condiciones binarias en el flujo de variables definidas en la restricción 13.

Determinación del área de análisis

Se determinó un área específica para realizar el modelo, y considerando la finalidad académica del proyecto se seleccionó una zona que proporcionara la información necesaria para un análisis significativo del proceso de asignación de rutas actual. La empresa transportadora tiene designadas unas 45 rutas que comprenden la zona urbana de Cali, sus corregimientos y municipios vecinos; cada ruta puede contener alrededor de unos 75 clientes (aproximadamente 3.375 clientes). Para realizar el modelo se tomó la zona que representa la mayor agrupación de clientes y presentaba mayores problemas a la organización.

Se escogió la zona centro de la ciudad de Cali en un área comprendida entre la Carrera 1 y la Carrera 25, entre Calles 1 y 14. En este sector las rutas de reparto correspondientes son de la 2 a la 5 y de la 7 a la 9.

Primero, se observó el proceso de enrutamiento, actividad clave para el modelo y se encontró que la asignación de rutas era realizada por una persona con gran experiencia que organiza las entregas según su parecer, por lo tanto, no existía un criterio cuantitativo que permitiera asignar las entregas a los vehículos teniendo en cuenta el lugar, el tiempo, el costo, etc.

Segundo, se realizó el acompañamiento a cada una de las rutas seleccionadas con la finalidad de recolectar datos como distancias, tiempos, y verificar la metodología utilizada para hacer las entregas y las recogidas de mercancía. Un factor predominante que se detectó en este acompañamiento fue la diferencia que existe en lo que se hace



Laboratorio de LOGYCA-GS1 Bogotá, 2008

y lo que se planea, debido a que el enrutador planea el recorrido que debe realizar cada vehículo, pero este recorrido no se cumple debido a que los conductores cambian la asignación original que se planteó.

Además, durante los recorridos se observó que la presencia de guardas de tránsito en el sector no permite ubicar el vehículo cerca de los destinatarios, lo cual ocasiona que se deban asignar puntos temporales de descarga de la mercancía en donde un estibador se encarga de las entregas, mientras el otro cuida la mercancía. Mientras tanto, el vehículo realiza un recorrido adicional hasta que pueda encontrar una zona de parqueo. En algunas ocasiones los destinatarios no recibían la mercancía sin cita previa y por lo tanto la entrega no podía ser cumplida.

Así mismo se detectó en el proceso de distribución de mercancía la inadecuada asignación de estos tres factores: ruta, vehículo, conductor y estibador; en este proceso se utilizan medios manuales y por su misma naturaleza se programa diariamente, sin tener en cuenta una asignación habitual de conductores y estibadores que puedan manejar más

efectivamente la ruta, y periodos de descanso para el personal, de tal forma que eviten el levantamiento continuo de pesos elevados.

Finalmente, el tiempo para entregar la mercancía también se ve afectado por factores externos tales como la espera de ascensores, los tiempos de espera en colas cuando se hacen entregas en almacenes de cadena y el tiempo destinado por los clientes cuando cancelan el servicio en efectivo.

Fase III: Seleccionando el modelo a utilizar

La complejidad de un modelo de asignación de rutas que permita la representación de un sistema depende directamente de la información de entrada que se suministre; a medida que se posea un mayor conocimiento e información del sistema el modelo permitirá una mejor representación del sistema real y por consiguiente la calidad de los resultados será mayor.

Para seleccionar un modelo a utilizar se debe tener en cuenta cómo se realiza la actividad de entregas y qué restricciones se presentan en el transcurso de la mis-



Laboratorio de LOGYCA-GS1 Bogotá, 2008

ma, como por ejemplo tiempos de espera para entregar la mercancía, tiempo de pago, pago del servicio, sistemas de probabilidad en el caso que se desconozca la ubicación de los clientes y el volumen a entregar. Se seleccionará el modelo VRP que se adapte a las necesidades y se da con frecuencia la necesidad de combinar varios modelos que representen la situación actual.

El modelo seleccionado utiliza el método de los ahorros, con el fin de reducir la distancia total viajada por todos los vehículos y minimizar indirectamente el número de vehículos necesarios para atender todas las paradas, sin exceder su capacidad. El método de valoración de ahorros de Clarke and Wright es suficientemente flexible como para manejar un amplio rango de restricciones prácticas, siendo relativamente rápido de calcular en una computadora para problemas con un número moderado de paradas y capaz de obtener soluciones que se encuentran al 2% del óptimo.

Software a utilizar

Existen dos tipos de software utilizados para la asignación de ru-

tas de transporte: Nivel académico y Nivel industrial. Las diferencias radican en la capacidad para el procesamiento de datos y el número de restricciones que involucran.

Debido a la falta de un acuerdo con los representantes de Caps Logistics para la adquisición del software Route Pro que permitía manejar parámetros más complejos como ventanas de tiempo y costos, se utilizó el software VRP Solver 1.3 [19] para realizar la simulación de las rutas de la zona centro, como resultado se obtuvo una serie de rutas asignadas de acuerdo con la distancia entre los clientes y la capacidad (carga) de los vehículos de reparto local.

Implementa la adaptación del algoritmo del ahorro de Clarke-Wright para problemas VRP. Utiliza operadores de movimiento de Intercambio (Swap) y reubicación (Or-opt) en su heurística de mejoramiento.

El software VRP Solver 1.3 [19] utiliza para la solución de este tipo de problemas dos tipos de herramientas:

1. Algoritmo de exploración: Branch and Bound

2. Algoritmo de construcción: Savings Criterion (Método de los ahorros)

Fase IV: Simulación del modelo

Adaptación de los datos

Al finalizar la recolección de datos en el acompañamiento, era necesario adaptar la información de manera que se pudiera procesar en la aplicación informática. Para ello se realizaron los siguientes pasos (Ver Figuras 5 y 6)

1. Identificación de destinatarios y su frecuencia de visita
2. Construcción de una lista de clientes por ruta.
3. Ubicación de cada cliente (latitud- longitud) con respecto al origen de coordenadas: Bodega principal. Para este procedimiento se utilizó un mapa digital para obtener una mayor precisión.
4. Unificación de una lista de clientes de todas las rutas analizadas teniendo en cuenta su posición (longitud, latitud y peso a entregar).

Resultados obtenidos

Al obtener esta lista unificada era posible ingresar al software la información para ser procesada. Igualmente fue necesario determinar la capacidad del vehículo de reparto local que en este caso se tomó como un estándar por vehículo de 2.8 toneladas, el cual es un factor predominante en la organización analizada.

Por limitaciones del software se dividió la lista de clientes en dos grandes grupos: de la ruta 2 a la 5 y de la ruta 5 a la 9. Para cada grupo se realizaron treinta simulaciones.

Luego de cumplido el número de iteraciones (determinado en los

parámetros) para cada simulación, se encontró la mejor solución, la cual contiene:

- Número de rutas requeridas para visitar TODOS los clientes de la lista, en un solo viaje, sin sobrepasar la capacidad del vehículo, mediante un criterio cuantitativo definido.
- Posicionamiento de clientes en cada ruta, a una distancia mínima y aplicando los principios de VRP (Ver Figura 7).

La mejor optimización fue encontrada en la ruta 2, en donde se logró disminuir la distancia total recorrida en un 8% (de 11,93 km. a 10,98 km.) y la ruta 8 en un 19% (teniendo en cuenta que se puede optimizar hasta un 20%) del 18% (de 17,56 km. a 14,34 km.).

Igualmente se le entregaron a la empresa los estándares para cada ruta: Tiempo de entrega, distancia recorrida, y unidades a entregar. Esta información es de vital importancia para continuar la utilización de la metodología VRP (ver Figura 8).

Finalmente, además de estos resultados, se crearon una serie de recomendaciones a tener en cuenta por la gerencia para optimizar el proceso, tales como: mejorar la comunicación del conductor y del enrutador para analizar las últimas novedades en la ruta. Una opción puede ser que haya semanal o quincenalmente una reunión para discutir cada ruta individualmente; a tal reunión deben asistir los conductores que hayan realizado la ruta y los enrutadores. Esta no debe ser mayor de 20 minutos y su resultado debe ser un reporte de inconvenientes y aportes y/o sugerencias de cada conductor con respecto a la ruta en discusión y establecer políticas para la asignación de conductores y estibadores a los móviles que se adapten a los cambios continuos que se deben realizar, con

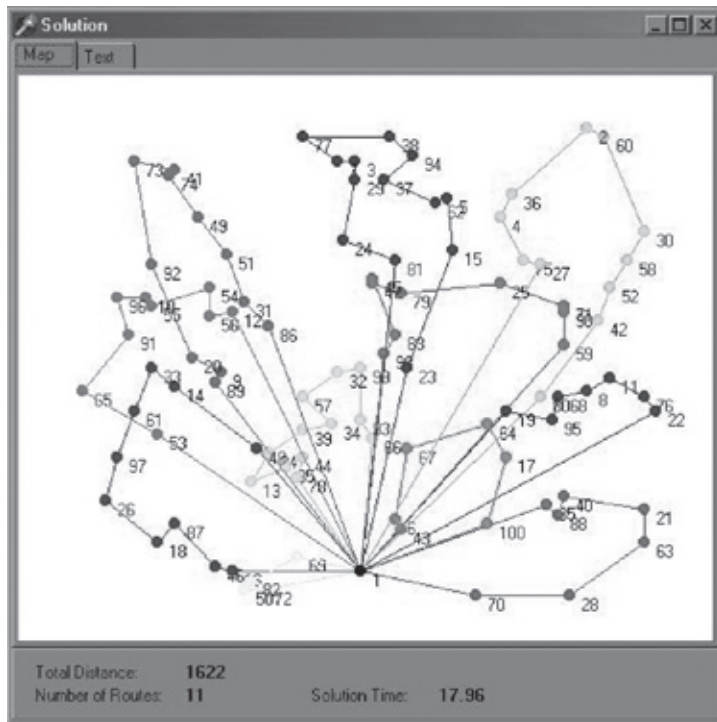


Figura 5. VRP Solver

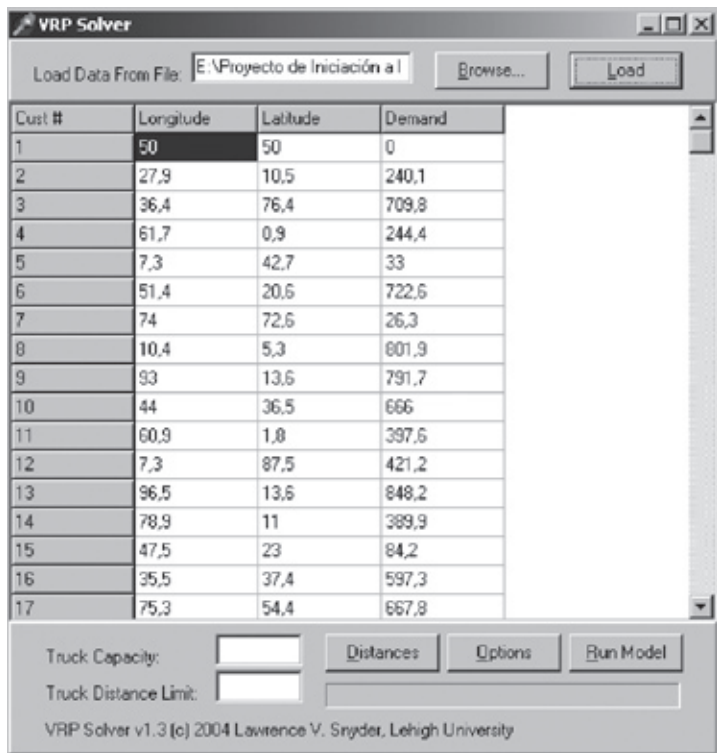


Figura 6. Inserción de datos en el VRP Solver

una rotación moderada y sanamente asignada, que vigile la integridad física y mental de los empleados y que respete sus preferencias y las de los clientes, para que exista un mayor nivel de satisfacción de los clientes internos y externos.

Conclusiones

Como respuesta a las condiciones globales es necesario que los operadores logísticos tomen una actitud agresiva frente a las nuevas exigencias del mercado, más aun cuando estamos en víspe-

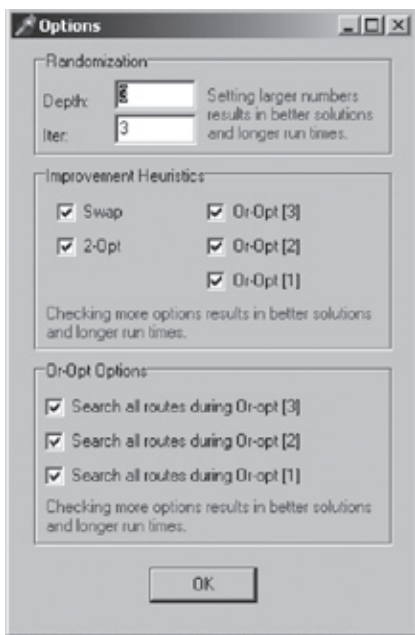


Figura 7. Determinación de parámetros para la simulación

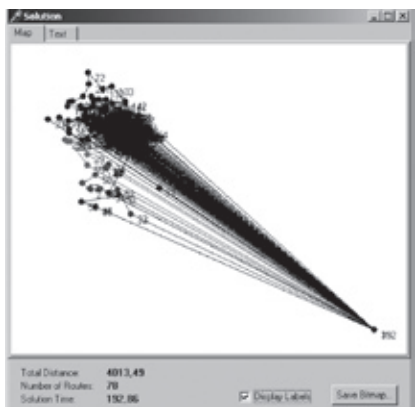


Figura 8. Resultados VRP Solver

ras de adoptar el Tratado de Libre Comercio-TLC en nuestro país, el cual sin duda, traerá consigo nuevas empresas de transporte que muy probablemente dominarán eficientes herramientas de análisis para la toma de decisiones que les permitirá minimizar riesgos y ofrecer atractivas ofertas de servicio.

El VRP es una técnica para asignar rutas de transporte a una serie de vehículos que deben entregar mercancía definida, y reemplaza las técnicas actuales que se rigen por la experiencia y que están siendo utilizadas por las organizaciones colombianas. Con la implementación de esta técnica podrían optimizar la planeación de la estrategia com-

Figura 9. Mejores simulaciones encontradas

Simulación	17	
Distancias		
Ruta 1	53.52	
Ruta 2	56.51	
Ruta 3	58.43	
Ruta 4	50.76	
Ruta 5	51.25	
Ruta 6	72.8	
Ruta 7	64.5	
Total	407.77	
Peso		
Ruta 1	2742.21	97.94%
Ruta 2	2795.64	99.84%
Ruta 3	2541.81	90.78%
Ruta 4	2373-45	84.77%
Ruta 5	2366.5	84.52%
Ruta 6	2797.44	99.91%
Ruta 7	2782.38	99.37%
Total Time	93.62	
Build Time	1.11	
Improve Time	95.52	
Or-Opt Time	36.84	
Num Or-Opt[3]	27	

Simulación	15	
Distancias		
Ruta 1	66.54	
Ruta 2	47.23	
Ruta 3	70.05	
Ruta 4	26.08	
Total	209.9	
Peso		
Ruta 1	2768.69	
Ruta 2	2619.43	
Ruta 3	2796.85	
Ruta 4	843	
Total Time	58.77	
Build Time	0.44	
Improve Time	58.33	
Or-Opt Time	160.45	
Num Or-Opt[3]	48	
Num Or-Opt[2]	225	
Num Or-Opt[1]	11	
Num 2-Oct:	20	
Num Swap	37	

petitiva y a su vez analizar y dar soluciones a los requerimientos de los clientes con un mínimo costo.

La característica más importante de utilizar simulación es la evaluación de alternativas operativas (escenarios) mediante las técnicas de simulación que permiten recrear la actividad actual de cualquier organización y tomar decisiones no tan apresuradamente, como suele hacerse. Los ahorros de la simulación se comprueban al identificar y eliminar problemas e ineficiencias que no podrían ser detectadas antes de la implementación, reduce costos al eliminar sobre diseños y factores excesivos de seguridad que son añadidos cuando algunos proyectos son inciertos.

Investigaciones futuras

Este proyecto es solo una pequeña parte de la aplicación que puede dársele a los sistemas de VRP; a continuación se exponen las investigaciones futuras que se derivan del proyecto “Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte” como la construcción de un modelo matemático de ruteo VRP que utilice simultáneamente la variabilidad de demanda y clientes como parámetros. Igualmente desarrollar una heurística de solución que se acerque al óptimo necesario. La implementación de un sistema VRPTW a un operador logístico de la región por un tiempo extendido. Para cumplir esta investigación es necesario que la empresa dispuesta a participar en el proyecto esté comprometida con este mejoramiento, y realizar un diagnóstico entre los operadores logísticos de la región, en el que se describan las diferentes herramientas que utilizan para la programación y asignación de rutas. Esta investigación permitirá que las empresas se actualicen y se adapten a un sistema VRP en caso de que alguna no lo utilice. ⚙️

Bibliografía

- [1] Acosta de Valencia, Zenaida. Regulación de los servicios de transporte en Colombia y comercio internacional. Bogotá: Colombia. Departamento Nacional de Planeación (DNP). 2004. 40 p.
- [2] Aksen, Denise. Customer selection and profit maximization in profit maximization in vehicle routing problems. Istanbul: Turquía. Koc University. 2005. 13 p.
- [3] Ballou, Ronald H. Business logistics management: Planning organizing, and controlling the supply chain. 4 ed. Upper Saddle River: New Jersey. Prentice-Hall, 1999 + 1 C. D. 2000. 816 p.
- [4] Baptista Lucio, Pilar; Fernández Collado, Carlos y Hernández Sampiere, Roberto. Metodología de la investigación. Ciudad de México: México. Mc Graw Hill, 1996. 505 p.
- [5] Baran, Benjamín. Comparación de un sistema de colonias de hormigas y una estrategia evolutiva para el problema del ruteo de vehículos con ventanas de tiempo en un contexto multiobjetivo. [en línea]. Asunción: Uruguay. Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción. 2004. [Consultado 11 Febrero de 2004] Disponible en web: <<http://www.cnc.una.py/cms/invest/download.php?id=94784,52,1>>
- [6] Bent, Rusell y Hentenryck, Pascan Van. Two stage hybrid local search for vehicle routing problem with time Windows. Brown University. 2001. 26 p.
- [7] Bramel, Julien. Logic of Logistics: Theory, Algorithms, & Applications for Logistics Management. New York: New York. Springer-Verlag, 1997. 285 p
- [8] Christopher, Martin. Estrategia Logística. 3ed. México. Limusa, 2000. 327 p.
- [9] Clarke, G. and Wright J. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, Operations Research, 12 #4, 568 p -581 p, 1964.
- [10] Dullaert, Wort. Scheduling flexibility and the contribution maximizing vehicle routing problem. [en línea] Providence: RI. Brown University. [Consultado 11 de Febrero de 2004] Disponible en web: <<http://ingenieur.kahosl.be/vakgroep/IT/Patat2002/OtherTT/Dullaert.pdf>>
- [11] Hall, Randolph. Handbook of Transportation Science. Stanford: California. Kluwer Academic Publishers, 2002. 570p.
- [12] Hillier, Frederiks, Lieberman, Gerald J. Introducción a la Investigación de Operaciones. Editorial Mc graw Hill, Bogotá: Colombia. 2001. 1088 p.
- [13] Jhonson, David s y McGeoch, Lyle A. The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization. Amhersts College. Department of Mathematics and Computer Science. 1995.
- [14] Larse, Allan. The Dinamic Vehicle Routing Problem. Copenhagen: Dinamarca. Editorial MM, 2000. 208 p.
- [15] M. W. P , Savelsbergh. An Efficient Approximation Algorithm for the Fixed Routes Problem. Eindhoven University of Technology. [en línea]. Atlanta: Georgia. Georgia Institute of Technology. 1992. [Consultado 11 de Marzo de 2004] Disponible en web: <<http://www2.isye.gatech.edu/~mwps/publications/job116.pdf>>
- [16] I. H. Osman. Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. Annals of Operations Research, 41:421 - 451, 1993.
- [17] Rego, Cesar. Node Ejection Chains for the Vehicle Routing Problem: Sequential and Parallel Algorithms. [en línea]. Oxford: Mississippi. Hearin Center for Enterprise Science, School of Business Administration. University of Mississippi. 1997. [Consultado Febrero 20 de 2004] Disponible en web: <<http://uportu.pt/~crego/papers/parallel.ps>>
- [18] Rusell, Bent. A two stage hybrid local search for vehicle routing problem with time windows. Ufsia-Ruca Faculty of Applied Economics. [en línea]. Antwerpen: Bélgica. University of Antwerp. 2001. [Consultado Febrero 20 de 2004] Disponible en web: <http://citeseer.ist.psu.edu/brent01twostage.html>
- [19] Salesbergh, M.W.P. An Efficient Approximation Algorithm for the Fixed Routes Problem. Atlanta: Georgia. University of Georgia. 1992. 18 p.
- [20] Snider Larry, VRP Solver Version 1.3. [en línea]. Philadelphia: Pennsylvania. Lehigh University. 2004 [Consultado Marzo 24 de 2004]. Disponible en web: <http://http://www.lehigh.edu/~lvs2/download/vrpsolver.html>
- [21] Taha Hamdy A. Investigación de Operaciones. México. Editorial Prentice may Pearson, 1998. 848 p
- [22] Dorronsoro, Bernabé. VRP web. [en línea]. Malaga: España. Universidad de Malaga, Departmamento de ciencias de la computación. 2004. [Consultado Enero 24 de 2004] Disponible en Web: <http://http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>
- [23] Vidal, Carlos Julio. Modos de Transporte e Indicadores. Presentación en powerpoint. Cali: Colombia. Universidad del Valle. 2004. 57p.
- [24] Vidal, Carlos Julio. Introducción a los sistemas de Transporte. Presentación en powerpoint. Cali: Colombia Universidad del Valle. 2004. 43 p.
- [25] Vidal, Carlos J. A Global Supply Chain Model UIT Transfer Pricing and Transportation Cost Allocation. Thesis in partial fulfillment of the requeriments for the degree Doctor of Philosophy in Industrial Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia. Mayo de 1998. 24 p.
- [26] Vidal, Carlos J y Goetschalckx, Mark. Modeling the impact of uncertainties on global logistics systems. Working Paper # 97-003, The Georgia Tech Center for International Business Education and Research, Octubre de 1997.