Algoritmo Meta-heurístico para Resolver el CVRP-HF

Julio Mario Daza-Escorcia¹, María Jimena Wilches-Arango², Ernesto Fidel Cantillo-Guerrero³

¹ Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, jdaza@uac.edu.co

² Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, mwilches@uac.edu.co

³ Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, ecantillo@uac.edu.co

RESUMEN

Este artículo presenta un procedimiento alternativo para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad y flota homogénea (CVRP-HF). Se propone un algoritmo metaheurístico que consta de la combinación de dos fases: diseño de rutas y planificación de la flota. La primera fase está compuesta de procedimientos heurísticos y metaheurísticos donde se construye una solución inicial que es mejorada mediante búsqueda tabú obteniendo soluciones no dominadas en tiempo de cálculo polinomial. Para la segunda fase, correspondiente a la planificación de la flota, se propone abordar el problema partiendo de una analogía con el problema de programación de máquinas paralelas idénticas. Este procedimiento tiene como función objetivo minimizar el costo fijo causado por la utilización de la capacidad instalada. Esta alternativa se aplicó sobre una instancia generada aleatoriamente y una instancia real arrojando resultados significativos al compararse con las heurísticas evaluadas.

Palabras claves: problema de ruteo de vehículos, problema del agente viajero, optimización combinatoria, metaheurístico.

ABSTRACT

This paper presents an alternative procedure to solve the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP-HF) with homogeneous fleet. The paper proposes a two-phase metaheuristic algorithm: routes design and fleet scheduling. The first phase is based on heuristics and metaheuristics procedures in order to build an initial solution that is then improved using tabu search to obtain non-dominated solutions in polynomial computational time. For the second phase, corresponding to fleet scheduling, the problem is approached using an analogy with the identical parallel machine scheduling problem. This procedure looks for the minimization of the fixed cost of using installed capacity as the objective function. The proposed procedure was tested using both a random-generated instance and real data, giving competitive results in comparison with other heuristics tested.

Keywords: vehicle routing problem, traveling salesman problem, combinatorial optimization, Meta-heuristic.

1. Introducción

El problema de enrutamiento o ruteo de vehículos (VRP, vehicle routing problem) data del año de 1959 y fue introducido por (Dantzig y Ramser, 1959), quienes describieron una aplicación real de la entrega de gasolina a las estaciones de servicio y propusieron una formulación matemática. Cinco años después, (Clarke y Wright, 1964) diseñaron el primer algoritmo que resultó efectivo para resolverlo. Y es así como se dio comienzo a grandes investigaciones y trabajos en el área de ruteo de vehículos.

Este problema puede entenderse como la intersección de dos conocidos problemas de optimización combinatoria. El primero, el del agente viajero (TSP, traveling salesman problem) considerando la capacidad de cada automóvil como infinita (Applegate et al., 2006) y el de empaquetamiento en compartimentos (BPP, bin packing problem) (Martello y Toth, 1990).

Por ende, el problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad y flota homogénea (CVRP-HF, capacitated vehicle routing problem with homogenous fleet) estudiado se considera un problema de optimización

combinatoria y pertenece a la clase de problemas NP-completos, para los que no existe un algoritmo de tiempo polinomial que pueda resolverlos a optimalidad. Esto ha llevado a muchos investigadores a explorar diversos métodos para abordarlos. La mayoría de estos métodos puede ser ampliamente clasificados ya sea como algoritmos "exactos" o "de optimización" (Aarts y Lenstra, 2003).

En este artículo se propone un procedimiento eficiente basado en técnicas metaheurísticas para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad y flota homogénea, denominado CVRP-HF. Este artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 presenta el VRP, sus variantes y su reducción a otros problemas de optimización combinatoria. La sección 3 presenta el planteamiento de la alternativa diseñada para generar una solución factible al problema planteado. Finalmente, se presentan en las secciones 4 y 5 respectivamente la evaluación de desempeño del modelo planteado y las conclusiones.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS (VRP)

A grandes rasgos un problema de ruteo de vehículos (VRP) consiste en, dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a los clientes máximo una vez. Dentro de esta definición, el problema se ubica en un amplio conjunto de variantes:

- CVRP (Capacitated VRP) (Ralphs, Hartman y Galati, 2001).
- MDVRP (Multi-Depot VRP) (Hjorring, 1995) PVRP (Periodic VRP) (Baptista, Oliveira y Zúquete, 2002).
- SDVRP (Split Delivery VRP) (Dror, Laporte y Trudeau, 1994; Archetti, Mansini y Speranza, 2001).
- SVRP (Stochastic VRP) (Laporte y Louveaux, 1998).
- VRPB (VRP with Backhauls) (Ralphs, Hartman y Galati, 2001); (Jacobs-Blecha y Goetschalckx, 1992).
- VRPPD (VRP with Pick-Up and Delivering) (Righini, 2000).
- VRPSF (VRP with Satellite Facilities) (Bard et al., 1997).
- VRPTW (VRP with Time Windows) (Cordeau et al., 2002).

2.2 PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO (TSP)

El TSP constituye la situación general y de partida para formular otros problemas combinatorios más complejos, aunque más prácticos, como el ruteo de vehículos y la programación de tareas dependientes del tiempo de alistamiento. En el TSP se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta a costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera, no se distinguiría de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones temporales.

Denotaremos por Δ +(i) y Δ -(i) al conjunto de nodos adyacentes e incidentes al nodo i, es decir, Δ +(i)={j \in V | (i, j) \in E} y Δ -(i)={j \in V | (j, i) \in E}. De manera similar, el conjunto de arcos incidentes hacia el exterior e interior del nodo i se definen como δ +(i) = {(i, j) \in E} y δ -(i) = {(j, i) \in E}. El problema puede entonces formularse matemáticamente mediante programación lineal entera (PLE) como sigue (Clarke y Wright, 1964):

$$\min \sum_{(i,j)\in E} c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

Medellín, Colombia

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in V$$
 (2)

$$\sum_{i \in \Lambda^{-}(i)} x_{ij} = 1 \qquad \forall j \in V$$
 (3)

$$\min_{(i,j)\in E} c_{ij} x_{ij} \qquad (1)$$
Sujeto a:
$$\sum_{j\in\Delta^{+}(i)} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in V \qquad (2)$$

$$\sum_{i\in\Delta^{-}(j)} x_{ij} = 1 \qquad \forall j \in V \qquad (3)$$

$$\sum_{i\in S, j\in\Delta^{+}(i)\setminus S} x_{ij} \geq 1 \qquad \forall S \subset V \qquad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in E \qquad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in E \tag{5}$$

2.3 COMPLEJIDAD DEL TSP Y APROXIMACIONES

La mayor parte de los problemas de ruteo de vehículos son generalizaciones del TSP. En ese sentido, puede considerarse el VRP más simple. No obstante, pertenece a la clase de problemas NP, debido a que tomando una secuencia cualquiera (certificado) ésta podría ser verificada en tiempo polinomial. Además, este problema puede considerarse del tipo NP-completo lo cual puede comprobarse reduciéndose el problema de optimización a uno de decisión mediante un ciclo hamiltoniano de la siguiente manera: dado un grafo G, ¿es posible determinar una ruta a través de todos los nodos de G una sola vez? (Garey y Johnson, 1979).

El tiempo de cálculo necesario para resolver el TSP se incrementa con rapidez a medida que aumenta el número de ciudades n. En un caso general el número de rutas factibles que debe considerarse es (n-1)!/2, puesto que hay (n−1) posibilidades para la primera ciudad después de la ciudad de residencia del agente, (n−2) posibilidades para la siguiente ciudad y así sucesivamente. El denominador 2 surge porque cada ruta presenta una ruta inversa equivalente con la misma distancia (TSP simétrico). Así, mientras un TSP con 10 ciudades tiene no menos de 200.000 soluciones factibles que deben ser consideradas, un problema con 20 ciudades tiene alrededor de 10¹⁶ soluciones factibles, mientras que un problema con 50 ciudades tiene alrededor 10⁶² (Hillier y Lieberman, 2001).

PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CON LIMITACIÓN DE CAPACIDADES Y FLOTA 2.3.1 HOMOGÉNEA (CVRP-HF)

Matemáticamente, una instancia I = (G, C, T, D, F) del CVRP-HF se puede definir como una extensión del m-TSP, dado un grafo dirigido G = (V, E), donde V es el conjunto de nodos que representan las ciudades o clientes y E es el conjunto de arcos que los conectan, relacionados con la matriz de costos C =(cij), de tamaño N x N, de modo que cada arco tiene asignado un costo cij. D es un arreglo de la forma (pi) que especifica la información de demanda de cada cliente. F es un arreglo de la forma (Pk) que contiene los datos de capacidad máxima de los vehículos. La flota está compuesta por M vehículos, es decir, $1 \le k \le M$.

El problema tiene el objetivo de encontrar una matriz $X = (x_{ijk})$, de tamaño $N \times N \times M$, donde las variables binarias xiik indican si el arco (i, j) se utiliza en la solución para ser visitado por k. El problema de PLE es como sigue:

August 3-5, 2011

$$\min \sum_{i=0}^{N} \sum_{i=0}^{N} \sum_{k=1}^{M} c_{ij} x_{ijk}$$
 (12)

$$\sum_{k=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} x_{ijk} \le M \qquad i = 0$$
 (13)

$$\sum_{k=1}^{M} \sum_{i=0}^{N} x_{ijk} = 1 \qquad \forall i \in [1, N]$$
 (14)

$$\sum_{k=1}^{N} \sum_{j=0}^{N} x_{ijk} = 1 \qquad \forall i \in [1, N] \qquad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ijk} = \sum_{i=1}^{N} x_{ijk} \qquad \forall k \in \{1, M\}, \quad i = 0$$

$$\sum_{k=0}^{N} \sum_{j=0}^{N} p_{k} x_{ijk} \leq P_{k} \qquad \forall k \in \{1, M\} \qquad (16)$$

$$\sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{N} p_i x_{ijk} \le P_k \qquad \forall k \in \{1, M\}$$
 (16)

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{\substack{j=1\\i \in S}}^{N} x_{ijk} \le |S| - 1 \qquad \begin{array}{l} \forall S \\ \subseteq (V - \{0\}), \\ |S| \ge 2, \\ k \in \{1, M\} \end{array}$$
 (17)

$$\begin{aligned} & \forall i, j \in [1, N], \\ x_{ijk} \in \{0, 1\} & \forall k \in \{1, M\} \end{aligned} \tag{18}$$

Las restricciones (13) indican que del centro de distribución deben partir máximo M vehículos. Las restricciones (14) y (15) garantizan que uno y solo un vehículo visite y abandone cada cliente formando por cada ruta un TSP. Las ecuaciones (16) muestran restricciones de capacidad vehicular en términos de peso, de acuerdo con lo sugerido por Dantzig y Ramser (1959); determinar el conjunto pi que no sobrepase pk se denomina problema de empaquetamiento en compartimentos (BPP por sus siglas en inglés). Finalmente los conjuntos de restricciones (17) y (18) establecen, respectivamente, la inexistencia de subrutas inconexas y los valores admisibles para las variables de decisión.

2.3.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

En la actualidad, la atención se ha centrado más y más en el uso de métodos de optimización combinatoria, debido a la complejidad de estos problemas en la obtención de soluciones óptimas en tiempo polinomial. Estas técnicas se dividen en técnicas de optimización local convencional (heurísticas) y técnicas de optimización local inteligente (meta-heurísticas). A diferencia de un enfoque algorítmico "exacto", un método meta-heurístico no tiene una base de matemática formal que lo sustente, es desarrollado más o menos por intuición (Ignizio y Cavalier, 1994).

La idea más genérica del término heurística está relacionada con la tarea de resolver inteligentemente problemas reales usando el conocimiento disponible (Narducci, 2005). Heurística proviene de una palabra griega con un significado relacionado con el concepto de encontrar y se vincula a la supuesta exclamación "Eureka" de Arquímedes al descubrir su famoso principio (De la Cruz, 2003). Reeves (1996) define el término heurística de la siguiente forma: "Una técnica heurística (o simplemente una heurística) es un método que busca buenas soluciones (es decir, soluciones cercanas al óptimo) a un costo computacional razonable sin poder garantizar optimalidad".

Las técnicas heurísticas para el VRP, en general, pueden ser clasificadas dentro de cuatro categorías (Gaskell, 1967), así: constructivas, como el método de los ahorros de Clarke y Wright, con base en el ahorro generado por insertar nuevos clientes en cada vehículo hasta completar una solución final; métodos de agrupar primero, luego enrutar, que agrupan los clientes en varios subconjuntos, asignan cada subconjunto a un vehículo y luego resuelven cada TSP correspondiente (por ejemplo, el método de Fisher y Jaikumar, basado en el problema de asignación generalizado y el algoritmo de barrido de Gillet y Miller); métodos heurísticos de enrutar primero, luego agrupar, que empiezan resolviendo el TSP definido por todos los clientes y luego parten la ruta hallada para asignar un tramo a cada vehículo (como el método de curvas de llenado de Bowerman, Calamai y Brenthall, y el método de partición óptima de Beasley); y finalmente, los métodos de mejoramiento, como los intercambios Or—Opt.

Las metaheurísticas (también llamadas heurísticas modernas) han aparecido durante las últimas dos décadas (Yu, 1998) y tienen como función tomar inicialmente una solución factible, para luego mejorarla usando heurísticas de mejoramiento embebidas en una estructura más general. La característica común de estos enfoques es el uso de mecanismos para evadir óptimos locales (Moraga, 2002). Glover y Laguna (1997) definen el término "metaheurística" como una estrategia maestra que guía y modifica otras heurísticas para producir soluciones más allá de aquéllas que son normalmente generadas en una solicitud por optimalidad local. Las heurísticas guiadas por tal meta estrategia pueden ser procedimientos de alto nivel o nada más que una descripción de movidas disponibles para transformar una solución en otra, junto con reglas de evaluación asociadas. Entre las técnicas meta heurísticas para el VRP se encuentran las colonias de hormigas, búsqueda dispersa, algoritmos genéticos y la búsqueda tabú, entre otras.

En esta investigación se optimizó la solución mediante la meta-heurística llamada búsqueda tabú. Ésta es la más reconocida entre las metaheurísticas y ha sido extensamente aplicada a numerosos problemas combinatorios tales como VRP, TSP, el problema de asignación cuadrática (QAP) o el problema de la mochila 0-1 multidimensional (0-1 multidimensional knapsack problem). De acuerdo con Laporte et al. (2000), el procedimiento de búsqueda tabú ha sido la más exitosa metaheurística, en especial para resolver el VRP. En su libro, Glover y Laguna (1997) presentan una muy buena discusión sobre la aplicabilidad de búsqueda tabú en problemas de optimización reales.

3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PROPUESTA

La alternativa diseñada e implementada para resolver el CVRP-HF es una aproximación meta heurística que consta de la combinación de dos fases que son el ruteo y la planificación, como se muestra en la figura 1.

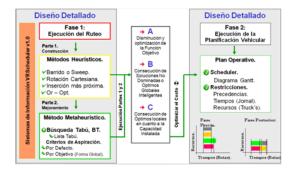


Figura 1. Planteamiento detallado del algoritmo propuesto

3.1 FASE I. DISEÑO DE RUTAS

La primera fase es de búsqueda estratégica y se compone de procedimientos heurísticos que pueden subdividirse en dos partes. La primera parte es denominada de construcción y utiliza métodos de optimización local convencional (heurísticas), con el objetivo de acercar el proceso hasta una muy buena solución inicial. La segunda parte, llamada mejoramiento, emplea un método de búsqueda local inteligente (metaheurística) con características de memoria para mejorar así los resultados logrados en la primera parte y obtener soluciones no dominadas, esto con un tiempo polinomialmente razonable.

Método de asignar primero, rutear después. Los métodos asignar primero y rutear después (cluster first, route second) procede en dos fases. Primero se busca generar grupos de clientes, también llamados clusters, que estarían en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada cluster se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad se consideran en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo. Por lo tanto, construir las rutas para cada cluster es un TSP que, dependiendo de la cantidad de clientes en el cluster, se puede resolver en forma exacta o aproximada.

Heurística del barrido o sweep. En la heurística de barrido (Wren, 1971; Wren y Holliday, 1972; Gillett y Miller, 1974), los clusters se forman girando una semirrecta con origen en el depósito e incorporando los clientes "barridos" por dicha semirrecta hasta que se viole la restricción de capacidad. Cada cluster luego se rutea resolviendo un TSP. El procedimiento se repite n veces, comenzando en cada ejecución por un cliente diferente a la forma en que se generan los clusters; las rutas obtenidas no se superponen, lo que puede ser bueno en algunos casos. Este algoritmo puede aplicarse en problemas planos, es decir, en los que cada nodo se corresponde con un punto en el plano y las distancias entre ellos se definen como la distancia euclidiana o, en su defecto, distancia de Manhattan.

3.1.1 HEURÍSTICA DE INSERCIÓN MÁS PRÓXIMA

Este es un método voraz (greedy, en inglés), que gradualmente construye un tour por la repetida selección de los arcos más cortos y los adhiere a un tour, con tal de que no cree un ciclo con menos de los N bordes, o aumentos el grado de cualquier nodo a más de 2. No se debe agregar el mismo borde dos veces durante el tour. La complejidad está dada por (O(n2log (n)) y normalmente presenta entre el 15 y 20 % de la HKLB (Johnson y McGeoch, 1995).

3.1.2 ALGORITMO K-OPT

Una versión reducida del algoritmo 3-opt es el algoritmo Or-opt (Or, 1976), que consiste en eliminar una secuencia de k clientes consecutivos de la ruta y colocarlos en otra posición de la ruta, de modo que permanezcan consecutivos y en el mismo orden. Primero se realizan las movidas con k=3, luego con k=2 y finalmente con k=1. En la figura 2 se muestra una ruta y todas las posibles maneras de reubicar los 3 primeros clientes a la manera de Or-opt. El tiempo de corrida del 2-opt producirá en el peor de los casos un tamaño de tour menor que el 5% sobre la HKLB, mientras que el mejoramiento de la heurística 3-opt tendrá usualmente un tour de 3% sobre la HKLB (Aarts y Lenstra, 2003). La complejidad en el peor de los casos es de O(log2(n)) para ambos movimientos (Fredman et al.,1995).

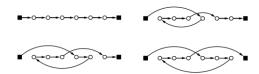


Figura 2. Movidas para reubicar los 3 primeros clientes de una ruta

3.1.3 BÚSQUEDA TABÚ (BT)

La búsqueda tabú es una técnica iterativa de búsqueda local inteligente que trata de evitar que las soluciones caigan en óptimos locales. Para esto se utilizan unas estructuras de memoria de corto y largo plazo, acompañadas de criterios de aspiración. En esta técnica en una iteración se pretende pasar de una solución a la mejor solución vecina, sin importar si esta es mejor o peor que la solución actual. El criterio de terminación puede ser un cierto número máximo de iteraciones o un valor de la función por optimizar. Entre las características relevantes que posee este método e implementadas en esta investigación se encuentran la denominada lista tabú y el criterio de aspiración. El objetivo más general de la lista tabú es continuar estimulando el descubrimiento de soluciones de alta calidad. En general, un tipo común de restricción opera seleccionando algún subconjunto de atributos y declarando un movimiento tabú un determinado número mínimo de veces. Otra característica de la BT son los

criterios de aspiración que se introducen para determinar cuándo pueden ser reemplazadas las restricciones tabú, eliminando así una clasificación tabú aplicada a un movimiento en otro caso (Glover y Melian, 2003).

En esta investigación se tienen en cuenta dos tipos de criterios de aspiración. El primero es el criterio de aspiración por defecto, que se presenta si todos los movimientos disponibles están clasificados como tabú, entonces se selecciona el movimiento "menos tabú". El segundo criterio es el de aspiración por objetivo forma global, la cual consiste en eliminar una clasificación tabú de un movimiento cuando el movimiento conduce a una solución mejor que la mejor obtenida hasta ahora. Teniendo en cuenta las características anteriores, el procedimiento meta-heurístico implementado permite guiar un algoritmo heurístico de búsqueda local para explorar el espacio de soluciones más allá de la simple optimalidad local.

3.2 FASE II. PLANIFICACIÓN DE LA FLOTA DE VEHÍCULOS

En la presente investigación se propone optimizar el uso de la capacidad instalada abordando un problema de secuenciación en máquinas paralelas idénticas, donde los recursos son los vehículos o transportadores, y los trabajos, las rutas a las cuales deben servir. En cuanto a los tiempos de procesamiento, estos son reemplazados por el tiempo que se tarda un transportador en abastecer todos los clientes de la ruta. Los tiempos son tomados de T, T=(Tij), una matriz de tamaño N x N que contiene los tiempos de ruta entre clientes, esto es, viajar desde el cliente i hasta j requiere Tij unidades de tiempo. En cuanto a las restricciones del modelo, encontramos primero las precedencias de las rutas y segundo el umbral de tiempo en el cual se debe realizar la programación de la jornada.

En la figura 3, es posible apreciar la manera en que la fase de planificación funciona. La mejor utilización de los tiempos inactivos produce una compresión del lapso, además permite disminuir los costos en que incurre un operador logístico al definir una cantidad de vehículos en un ruteo determinado, esto mediante la utilización de los tiempos inactivos de las rutas preconcebidas en las fases de construcción y mejoramiento, para reorganizar así estas tareas.

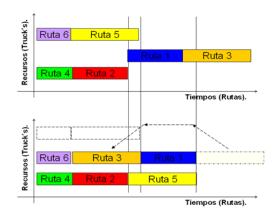


Figura 3. Funcionamiento de la fase de planificación

4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

Este modelo se aplicó sobre dos instancias, una de ellas proveniente de una aplicación real. Por cuestiones de confidencialidad no es posible presentar los datos utilizados, puesto que refleja la aplicabilidad de una herramienta algorítmica en la realidad. Debido a la escala de la problemática, la evaluación del desempeño de CVRP-HF ha sido concentrada en las variables de transporte de un único tipo de productos en una flota homogénea. En la bibliografía existente se hace referencia a procedimientos heurísticos y metaheurísticos; es extenso el tratamiento del problema con las variables mencionadas, siendo al mismo tiempo escasa en cuanto al tratamiento de problemas relacionados con programación vehicular.

Las instancias presentadas han sido evaluadas en las aplicaciones Cuc-Tech VRScheduler v1.0. El procedimiento propuesto fue comparado con otras herramientas disponibles para el enrutamiento de vehículos, como son BT for VRP, AAVRP y VRP Solver. BT for VRP (Cabarcas, 2002) propone un procedimiento basado en algunas características de memoria de búsqueda tabú y obtiene resultados satisfactorios. AAVRP (Filadelfo y Pérez, 2003) utiliza métodos de optimización local convencional como el barrido o sweeping y algunas características de la heurística de inserción, con lo que obtiene resultados satisfactorios en tiempo polinomialmente razonable. VRP Solver v1.3 (Snyder, 2004) es una aplicación que lleva a cabo una adaptación de algoritmo de ahorros en combinación con una versión reducida del algoritmo 3-opt, el cual construye rutas del vehículo que visitan cada ciudad precisamente una vez obedeciendo a la capacidad del vehículo especificado por el usuario y sus límites de distancia.

Las aplicaciones descritas fueron evaluadas en condiciones iguales en un computador Laptop marca Acer TravelMate 2423 WXCi, Intel Celeron M processor 370 (1.5 GHz, 400 MHz FSB, 1MB L2 cache), 40GB HDD, 256MB DDR2 (support dual-channel). Con estas condiciones se presentan a continuación, los resultados obtenidos de las instancias empleadas para evaluar el desempeño de la alternativa algorítmica diseñada e implementada.

Es notable el grado de optimización mostrado en la herramienta algorítmica propuesta, debido a que presentó un resultado alentador en lo que respecta a la distancia total recorrida ocupando el segundo lugar y solo siendo superada por el VRPSolver v1.3, pero en lo que respecta a la disminución de la capacidad instalada (mediante la planificación) presentó un desempeño mejor que todas las aplicaciones evaluadas. El resultado para la instancia real asciende a la utilización de 15 camiones, la herramienta estableció un total de 6 vehículos, lo que muestra ahorros significativos. Este resultado fortalece la validez y la pertinencia del procedimiento, véase tabla 1.

Instancias	Aplicaciones	Tamaño de Flota	Costo de Flota	Función Objetivo	
				Distancias (uad)	Tiempos (uat)
Instancia 1	AAPRV	10 Truck's	\$ 2.070.000	1011,8	25,3
	BT for VRP	9 Truck´s	\$ 1.863.000	780,95	19,52
	VRP Solver v1,3	9 Truck´s	\$ 1.863.000	637,92	15,95
	VRScheduler v1,0	6 Truck's	\$ 1.242.000	748,92	18,72
Instancia 2	AAPRV	8 Truck's	\$ 1.656.000	1598,5	26,64
	BT for VRP	8 Truck's	\$ 1.656.000	850,263	14,17
	VRP Solver v1,3	8 Truck's	\$ 1.656.000	794,34	13,24
	VRScheduler v1,0	4 Truck's	\$ 828.000	813,91	13,57

Tabla 1. Comportamiento de resultados.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con base en la alternativa meta heurística de dos fases para el problema de ruteo de vehículos, con restricciones de capacidad y flota homogénea, permiten concluir que la aplicación de procedimientos heurísticos que implementen un proceso de programación de operaciones vehiculares puede presentar un comportamiento homogéneo y confiable ante diversas instancias de situaciones problemáticas reales del ruteo de vehículos.

En general, se encontraron soluciones muy buenas al problema en lo que respecta al tiempo computacional Tc requerido, el cual es sorprendentemente menor de un minuto (Tc<1min), además se encontró una notable mejoría en la determinación del número óptimo de camiones para asignar a los clientes, esto mediante la planificación, llevando así a disminuir el costo fijo de la capacidad instalada de hasta en un 50% menos que con las otras aplicaciones evaluadas en la presente investigación.

Los anteriores resultados pueden llevar a concluir que esta alternativa podría resultar muy conveniente en la práctica, si se cuenta con procesamiento de mediano a alto nivel. En esto radica su ventaja práctica y en la organización de las soluciones para una gestión provechosa. En consecuencia, se deduce también que el objetivo general de desarrollar una opción que permita mejorar la planeación y asignación de las rutas de transporte en las empresas de carga y mensajería se cumple a cabalidad.

Se evaluaron características de desempeño de varias metodologías de optimización en trabajos previos, justificando la escogencia de las heurísticas elegidas y la meta heurística búsqueda tabú para la propuesta; se diseñó e implementó el algoritmo en lenguaje Visual Basic 6.0, con una sencilla, agradable y didáctica interfaz gráfica para agilizar el análisis experimental.

REFERENCIAS

- Aarts, E. and Lenstra, J. Local search in combinatorial optimization. John Wiley & Sons. 2003.
- Applegate, David L.; Bixby, Robert E.; Chvátal, Vasek and Cook, William J. "The traveling salesman problem: a computational study". Princeton University Press, 2006, 606 p.
- Archetti, C.; Mansini, R. and Speranza M. G. "The split delivery vehicle routing problem with small capacity", Technical Report n. 201, Department of Quantitative Methods, University of Brescia, 2001.
- Arora, S. "Polynomial time approximation schemes for euclidian traveling salesman and other geometric problems", Journal of the ACM, vol. 45, No. 5, September 1998, pp. 753-782.
- Baptista, S.; Oliveira, R. C. and Zúquete, E. "A period vehicle routing case study", European Journal of Operational Research, 139:220-229, Elsevier, 2002.
- Bard, J. F.; Huang, L.; Dror, M. and Jaillet, P. "A branch and cut algorithm for the VRP with satellite facilities", IIE Transactions 30, pp. 821-834. 1997.
- Cabarcas, Juan. Desarrollo de una alternativa algorítmica para enrutamiento de vehículos con restricciones de capacidad. Barranquilla, 2002, 83 p. Trabajo de grado (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte.
- Clarke, G. and Wright, W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research, No. 12 (1964), pp. 568-581.
- Cordeau, J.-F.; Desaulniers, G.; Desrosiers, J.; Solomon, M. M. and Soumis, F. "VRP with time windows". In P. Toth and D. Vigo (eds.): The vehicle routing problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, vol. 9, Philadelphia, PA, 157-193. 2002.
- Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. The truck dispatching problem. En: Management Science 6, No. 1 (1959); p. 80-91. Citado por ARONSON, L. Algorithms for vehicle routing A survey. Delft, 1995, p. 43.
- De la Cruz, Jair. Alternativa heurística de dos fases para el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo, múltiples productos y flota heterogénea. Barranquilla, 2003, 155 p. Tesis de maestría (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte.
- Dror, M.; Laporte G. and Trudeau P. "Vehicle routing with split deliveries", Discrete Applied Mathematics 50, 239-254. 1994.
- Filadelfo, Samuel y Pérez, Gina. Desarrollo de una alternativa para mejorar el enrutamiento actual de la empresa transportadora de carga y mensajería Colvanes Ltda. Barranquilla, 2003, 80 p. Trabajo de grado (Ingeniería Industrial). Corporación Universitaria de la Costa.
- Fredman, M. L.; Johnson, D. S.; McGeoch L. A. and Ostheimer, G. "Data structures for traveling salesmen", Journal of Algorithms 18 (3), 1995, pp. 432-479.
- Garey, Michael R. and Johnson, David S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness. W. H. Freeman. 1979.
- Gaskell, T. Bases for vehicle fleet scheduling, Operational Research Quarterly, No. 18 (1967), pp. 281-295.
- Gillett, B. and Miller, L. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. Operations Research, 22 (1974) 340-349.
- Glover, F. and Laguna, M. (1997). Tabu search. Kluwer Academic Publishers.
- Glover, Fred and Melian, Belen. Tabu search. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. No 19, (2003), pp. 29-48.
- Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. Introduction to operations research, 8th ed, McGraw-Hill, 2001, pp. 621-623.

- Hjorring, C. "The vehicle routing problem and local search metaheuristics", Chapter 2. PhD thesis, Department of Engineering Science, The University of Auckland, 1995.
- Ignizio, J. and Cavalier, T. Linear programming. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994, 666 p.
- Jacobs-Blecha, C. and Goetschalckx, M. "The vehicle routing problem with backhauls: properties and solution algorithms". Technical Report, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia. Presented at the National Transportation Research Board, January 13-15, 1992, Washington DC.
- Johnson, D. S. and McGeoch, L. A. "The traveling salesman problem: a case study in local optimization", November 20, 1995.
- Johnson, D. S.; McGeoch L. A. and Rothberg, E. E. "Asymptotic experimental analysis for the Held-Karp traveling salesman bound". Proceedings of the Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, 1996, pp. 341-350.
- Karp, R. Reducibility among combinatorial problems. In: Miller R. and Thatcher J. (eds.). Complexity of Computer Communications. Plenum Press, New York. 1972.
- Laporte, G.; Gendreau, M.; Potvin, J. and Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. International Transaction in Operational Research 7, 285-300.
- Laporte, G. and Louveaux, F. V. "Solving stochastic rout- ing problems with the integer L-shaped method". In: Fleet Management and Logistics, T.G. Crainic and G. Laporte (eds.), 159-167, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- Martello, S. and Toth, P. Knapsack problems. Wiley, Chich- ester 1990.
- Miller, C.; Tucker, A. and Zemlin, R. Integer programming formulation of traveling salesman problems. Journal of the ACM No. 7 (1960), pp. 326-329.
- Moraga, R. J. (2002). Meta-RaPS: an effective solution approach for combinatorial problems. Ph.D. thesis. Orlando, FL: University of Central Florida.
- Morton, T. and Pentico, D. Heuristic scheduling systems. John Wiley & Sons, 1993.
- Narducci, Francesco. Programación de talleres intermitentes flexibles, por medio de la heurística del margen de tolerancia. Barranquilla, 2005, 117 p. Tesis de maestría (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte.
- Nilsson, C. "Heuristics for the traveling salesman problem", Department of Computer Science, Linkoping University, 2003.
- Ralphs, T.; Hartman, J. and Galati, M. "Capacitated vehicle routing and some related problems". Rutgers University, 2001.
- Reeves, C. Modern heuristic techniques. In: Rayward- Smith, V. J.; Osman, I. H.; Reeves, C. R. and Smith, G. D. (eds.), Modern Search Methods, John Wiley & Sons, 1996.
- Or, I. Traveling salesman type combinatorial optimization problems and their relation to the logistics of regional blood banking (1976).
- Qiu, L. and Hsu, W. J. (1999). Scheduling and routing for AGVs: a survey. Technical Report, CAISTR- 99-26, Center for Advanced Information Systems, Nanyang Technological University, Singapore.
- Righini, G. "Approximation algorithms for the vehicle routing problem with pick-up and delivery", Note del Polo Ricerca 33, Polo Didattico e di Ricerca di Crema, Università degli Studi di Milano, July 2000.
- Snyder, Lawrence V. (2004). Adaptation of Clarke-Wright with Or-Opt for the vehicles route problems, Lehigh University, www.lehigh.edu/~lvs2.
- Wren, A. Computers in transport planning and operation. Ian Allan (1971).
- Wren, A. and Holliday, A. Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. Operational Research Quarterly 23 (1972) 333-44.
- Yu, G. (1998). Industrial applications of combinatorial optimization. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.

3-5,