

MODELO DE RUTEO DINÁMICO PARA LA OPERACIÓN DE TRANSPORTE DE VALORES

Autor: José Luis Morales Alvis

Director: Mónica Castañeda Riascos

Resumen

El transporte de valores es una industria que a lo largo del tiempo ha invertido sus esfuerzos y mejoras en la seguridad más que en la optimización de los procesos. Este trabajo busca mostrar un método mediante el cual se puede automatizar el modelo de ruteo para la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta las restricciones propias del transporte de valores, el modelo propuesto es un *vehicle Route problem with time window VRPTW* con múltiples depósitos, siendo así un MDVRPTW. Para atender la gran cantidad de clientes se requiere una búsqueda Tabú que mejore el rendimiento del algoritmo al momento de buscar la ruta óptima, se propone este modelo heurístico el cual busca satisfacer varios objetivos de optimización de acuerdo a unos recursos. El algoritmo descrito es el que más se ajusta a un modelo de transporte de valores.

Palabras clave

Optimización, VRP, transporte de valores, metaheurística

1. Introducción

Este artículo basa su estudio en una empresa dedicada a ofrecer soluciones en el manejo de valores. Esta empresa ofrece un servicio logístico de transporte de valores que consiste en llegar a las oficinas del cliente en un día y un rango horario específico a hacer entregas y recolecciones de valores, posteriormente llevar dichos valores a bóvedas de la empresa transportadora a que sean procesados. En algunos casos esos valores son llevados a otras oficinas del cliente según sea su requerimiento, sin embargo este tipo de servicios representa menos del 1% de la demanda nacional, el 99% restante consiste en transportar valores desde los clientes hasta los cuartos de procesos de la empresa de transporte de valores o viceversa.

Bajo estas circunstancias, tener un modelo óptimo de gestión de rutas por ciudad es pieza fundamental no sólo en el ahorro de recursos, sino para garantizar la promesa de servicios con los clientes que es llegar a tiempo el 97% de las veces en el rango de tiempo pactado. Los clientes a los cuales se les presta el servicio son básicamente el sector financiero 29% (oficinas y cajeros automáticos) y el sector comercial legalmente constituido que representa el 71 % de los clientes.

Para prestar estos servicios de recolección y entrega de valores se cuentan con diferentes modelos operativos que varían según el nivel de seguridad requerido en la zona y monto promedio de entrega del cliente. Dependiendo de estas dos variables; los servicios se pueden prestar en rutas de camión blindado con 3 hombres, o incluso rutas de moto dual (dos motos) o sencilla. Cada una de ellas cuenta con un límite máximo a transportar y se definen además dependiendo de las condiciones de seguridad de la zona.

Las formas de medición de este servicio se dan por el indicador de cumplimiento hacia los clientes, sin embargo en términos de productividad, el indicador que garantiza un uso adecuado de recursos es el que mide el número de servicios que se hacen por cada hora laborada. La ciudad de Bogotá al igual que las grandes ciudades del mundo cuenta con situaciones de tráfico complejo y denso, en términos de productividad existen ciudades más grandes y con sistemas de tráfico más complejos y densos (Aguilar, 2004). En estos lugares se obtienen mejores mediciones de productividad, por ejemplo San Pablo (Br), cuenta con un indicador de productividad de 2.4 servicios por hora, ciudad de México 2.3 servicios por hora y claramente son ciudades más grandes que Bogotá donde el indicador apenas oscila en 1.4 servicios hora.

Algunas de las razones por las cuales ciudades más grandes y complejas en términos de tráfico obtienen mejores indicadores de productividad manteniendo el nivel de cumplimiento; es porque han minimizado la toma de decisiones en ruta basados en experiencia de las personas. Mediante procesos ágiles y ayuda de sistemas informáticos logran ajustar su operación a los cambios repentinos que pueden surgir en la ruta, tales como cancelaciones, servicios especiales y accidentes de tránsito.

Este trabajo busca identificar el tipo de modelo de ruteo que permita optimizar este tipo de operación logística, involucrando modelos de rutas que incorporen el uso de herramientas informáticas que no permitan depender de la experiencia de los conductores para elegir como llegar de un punto a otro; incluso plantear la forma de como involucrar los cambios normales de variables durante el día tales como tráfico, novedades de capacidad, cancelaciones y solicitudes de servicios especiales por parte de los clientes.

2. Marco teórico

A continuación, se presentan algunos conceptos previos necesarios para desarrollar esta tesis, los conceptos están relacionados con temas de optimización y logística de transporte de valores:

Transporte de valores. De acuerdo con Jorge L. Acatitla Anguiano se define como: “un servicio complementario del sector financiero que permite a los bancos y clientes de los mismos, el trasladar su dinero y objetos de valor, así como el transferir los riesgos inherentes a esta actividad, mediante mecanismos especializados que involucran a personas, dispositivos tecnológicos y procedimientos específicos, debidamente coordinados entre sí con la finalidad de disminuir la probabilidad de siniestros, no solo durante la realización del servicio sino antes y después del mismo. Su operación contempla la protección de la integridad física tanto del personal de las empresas de traslado de valores, los trabajadores de las empresas a las que se les presta el servicio y sus clientes.”

Recolección de valores. Es la acción que hace la empresa transportadora de valores de dirigirse a la dirección del cliente en un esquema de seguridad predefinido, mediante

un proceso de identificación riguroso recibe del cliente unidades de carga sellada (UCS) con un valor declarado, y las transporta desde ese punto a un sitio previamente definido. Existen modalidades que dependen de la ubicación del cliente, de acuerdo a esto hay recolecciones urbanas e interurbanas. En el primer caso son locaciones ubicadas en casco urbano de ciudades principales, en el segundo caso la ubicación del cliente se encuentra en poblaciones cercanas o sobre vías interdepartamentales o municipales.

Para la entrega de valores su configuración es similar en todos los aspectos a la recolección, pero en este caso se hace entrega de UCS a los clientes bajo protocolos de seguridad predefinidos.

Ruta óptima: Orden lógico de servicios asignados para ejecución que un conductor debe seguir y que contiene la malla vial específica para llegar más rápido a destino, por una vía en la que un camión blindado pueda transitar. Esta ruta debe contener tiempos de llegada aproximada.

Modelo de ruteo dinámico: Según el libro Administración de Flota Dinámica, se define como un entorno donde la información es cambiante y no necesariamente conocida en la planeación inicial, cambia después de la construcción del plan de rutas inicial y durante la ejecución del mismo (Zeimpekis, Tarantilis, George, & Loannis, 2007). Este entorno hace referencia a información de flota, adiciones o cancelaciones de puntos a atender, personal disponible y congestión vial.

Problema de Ruteo de Vehículo (VRP): Por sus siglas en inglés Vehicle route Problem, es la evolución del problema del agente viajero TSP. Un algoritmo para hallar la programación de rutas más óptima en una flota de camiones asignado dichos vehículos para que cumplan la demanda de clientes que se encuentren dispersos en un área partiendo de un punto o depósito específico y regresando a él al final del periodo, (Herazo, 2012). Desde su creación ha tenido diferentes cambios o evoluciones a lo largo del tiempo que han aumentado su complejidad incluyendo diferentes variables o variantes tales como: Flotas Heterogéneas (HF, Heterogéneos Fleet VRP), Ventanas de Tiempo (VRP with Time Windows, TW), Multi Depósitos (MD, Multiple Depots VRP), Capacidad del

vehículo (C, Capacited VRP), Entregas Divididas (SD, Split Delivery VRP), Recogida y Entrega (VRP Pickup and Delivery PD), cada una de estas variables ha sido claramente desarrollada por diferentes autores haciendo el VRP una herramienta poderosa y ajustable a diferentes industrias logísticas con soluciones demostrables, para efectos de este trabajo se tendrá en cuenta el problema de ruteo de Vehículos Dinámico (Dynamic VRP) con algunas adiciones.

Aprovisionamiento de cajeros automáticos. Esta actividad consiste en la administración del efectivo del ciclo de una máquina ATM (Automatic Teller Machine), donde se realiza una recolección de los valores del ciclo anterior y se depositan nuevos valores para iniciar un nuevo ciclo controlado.

Ruta maestra: Obedece a la demanda esperada por tipo de día de servicios que se deben realizar y que previamente el cliente ha especificado por tipo de servicio, día de la semana requerido periódicamente y rango específico en el que la transportadora debe hacerlo.

Ruta diaria: Acorde a los servicios establecidos en rutas maestras y los cambios que haya solicitado el cliente hasta antes del día de operación, se establece la demanda por rutas para un día específico.

Servicios especiales: Se conoce como servicio especial todos aquellos servicios que el cliente solicita y que deben ser realizados el mismo día en un rango predefinido después de la solicitud.

Cancelaciones: Durante el día de operación el cliente puede llamar y solicitar que no le sea realizado el servicio programado previamente. Normalmente esta cancelación se debe hacer como mínimo con una hora de antelación a que inicie el rango del servicio.

Paradas fallidas: Se da cuando una ruta llega al punto del cliente a realizar el servicio y por alguna razón dicho servicio no se puede hacer.

3. Revisión de literatura

En esta sección se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos sobre literatura enfocada en sistemas de ruteo dinámico que contemplen diversas variables tales como: atención de puntos con ventanas de tiempo definido, adaptación de capacidad, restricciones de tráfico, cambios en demanda, basados en la aplicación y adaptación de algoritmos a problemas de la vida real en la industria logística.

Rojas Mejías (2012). Expone un modelo heurístico de ruteo dinámico en empresas de transporte logístico con ventanas de tiempo para Santiago de Chile. Esta es una gran aproximación a un sistema de ruteo dinámico ajustable a empresas de transporte de valores. En ella se exponen las condiciones de técnicos que requieren visitar clientes en ventanas de tiempo cambiantes y a través de modelos matemáticos ajustar dicha operación a un número de recursos y ordenamiento de la ruta. Sin embargo, no contempla todas las variables que en tiempo real normalmente pueden afectar un ordenamiento de la ruta.

Sabar Nasser R (2019). Propone un algoritmo autoadaptativo evolutivo (SAEA) por sus siglas en inglés, este algoritmo incorpora en el clásico problema de ruteo de vehículos las restricciones de tráfico, realiza una simulación computacional y obtiene unos resultados satisfactorios comparados con los algoritmos convencionales de VRP (vehicle route problem). Incluso mejores que algoritmos dinámicos. No obstante, su simulación se hizo sobre supuestos teóricos y no sobre datos reales, por lo tanto no es factible aplicarlo sobre rutas reales que se vayan o ya se hayan ejecutado, es más bien una base sobre la cual se pueden ya no solo incorporar el tráfico como una restricción sino más bien como una variable a tener en cuenta en sus cálculos.

Arnau, Qui, Juan, Angel, Serra, Isabel (2018). Realiza un algoritmo mostrando un enfoque donde todos los parámetros que constituyen un modelo de ruteo dinámico son variables y pueden cambiar de acuerdo a las circunstancias de un momento específico, no tiene en cuenta restricciones de tráfico, sin embargo abre la

discusión sobre dimensionar cuanto es el impacto al medio ambiente en términos de emisiones producidas por una operación de transporte.

Lepesqueur Sarmiento Angélica. (2014). Plantea una tesis con una solución multiobjetivo a un problema, con una vasta investigación de modelos aplicados de VRP, desde una perspectiva no solo de costos sino también del medio ambiente. Su trabajo se basó formular una solución logística general, esta solución deja por fuera del estudio y análisis las variaciones propias de la ruta, es decir toma un modelo con variables predefinidas y constantes, esto en la realidad no es del todo aplicable ya que durante el día existen cambios por factores incluso externos a las organizaciones que afectan una operación logística.

Ouaddi, Khaoula; Benadada, Youssef Mhada, Fatima-Zahra Jun2018. Propone un Sistema de colonias de hormigas para problemas de enrutamiento dinámico de vehículos con el tiempo extra, agregando el factor dinámico por medio de servicios especiales o cancelaciones que puedan tener las rutas al modelo y costos. Plantea una forma muy distinta de resolver el VRP con resultados comparables a los algoritmos clásicos de ruta más corta. A este modelo le hace falta tener en cuenta la variabilidad en tiempos de atención en cada punto y restricciones propias del tráfico.

A.L. Koka, EW Hansb, JMJ Schuttenb (2011). En su trabajo de conducción del vehículo en tiempos de viaje dependientes del tiempo: el impacto de evitar la congestión, plantea una solución de modelo dinámico de enrutamiento de vehículos DVRP con el uso de un algoritmo Dijkstra modificado y una heurística de programación dinámica restringida. Después de planteado el modelo, realiza simulaciones obteniendo que las congestiones de tráfico se pueden evitar y por ende los retrasos y costos por tiempo adicional pueden ser eliminados de un modelo, este método aunque es general, presenta grandes avances con respecto al problema planteado en este trabajo.

Ranga Raj, Sarath Babu, Kyle Benson, Gaurav Jain, B. S. Manoj, Nalini Venkatasubramanian (2015). Propone el uso de un VRPTW para modelar la atención de emergencias de una pequeña ciudad en la india, donde las llamadas llegan

de diferentes ciudadanos y el acceso a las zonas de emergencia se debe hacer en tres diferentes tipos de vehículos con limitada capacidad de atención. Como resultado del ejercicio se observa dos posibles respuestas basadas en el mínimo desplazamiento y tendencia sobre donde será el próximo evento, en ambos casos la idea es tratar de atender todos los eventos posibles en el tiempo estipulado, en los dos casos los resultados son satisfactorios al menos en evaluación computacional.

Gao guibing, Zhang hongbo, Zhang daobing (2012). En su trabajo llamado “La optimización del plan de enrutamiento de distribución de materiales en el sistema de fabricación de flujo basado en un algoritmo evolutivo de objetivos múltiples”, propone un algoritmo para la distribución de materiales a diferentes puestos de trabajo dentro de la industria de manufactura siempre en pro de mantener un flujo continuo en la fábrica, usar toda la capacidad de los vehículos, minimizar los recorridos y reducir costos, esto es conocido como un algoritmo multiobjetivo, en su trabajo introduce valores reales para simular el rendimiento y obtener resultados que a la postre muestran una optimización de más del 20% en comparación con el modelo tradicional. Esto muestra una aplicación importante no solo externamente en el ámbito logístico sino al interior de una fábrica para abastecer adecuadamente estaciones de trabajo.

Zhiwei Liu, Kang Zhou, Falin Jiang, Yiting Zhen (2017), en su trabajo propone una búsqueda Tabu y una membrana computarizada para resolver el VRPTW. En este caso los autores hacen una comparación de dicha combinación contra el VRPTW tradicional y una base de datos, notando grandes ventajas dado que el algoritmo se vuelve más preciso para hallar resultados óptimos en un 15% y el tiempo de iteración se reduce en más del 50%. Por tanto este trabajo muestra que de esta forma se puede optimizar el rendimiento del VRPTW con grandes resultados.

Qinhong Fu, Kang Zhou, Huaqing Qi, Falin Jiang (2018), propone un algoritmo de búsqueda Tabú modificada para resolver el VRP tradicional, en este artículo se muestra mediante varias simulaciones como la búsqueda Tabu mejora los resultados frente a resultados de varios algoritmos de VRP estándar mediante un caso de prueba,

los resultados muestran mejoras en tiempos y exactitud del algoritmo pero muestran también que hay inestabilidad a grandes cantidades de datos.

S. Geetha, P. T. Vanathi, G. Poonthilir (2012), realiza un trabajo de resolver un VRP multi depot o MDVRP a través de algoritmos heurísticos y metaheurísticos aplicados a casos reales de logística de distribución de medicamentos con varias bodegas en una ciudad, con diferentes pedidos y altos estándares de entrega a clientes, el segundo caso en el que se prueba el algoritmo es relacionado con la recolección de residuos en una ciudad por medio de carros recolectores, el resultado de este trabajo muestra que se requiere una agrupación inicial de datos para que la metaheurística funcione adecuadamente y los resultados sean óptimos.

Do Duy Thanh, Nguyen Dinh Thuan, Nguyen Tan Phat, Nguyen Trong Nghia (2017), introduce la Búsqueda Tabu como mecanismo para solucionar el VRPTW agregando un operador de movimiento y movimientos propios de la búsqueda Tabu para lograr minimizar el uso de vehículos y la distancia recorrida, en este caso para que el algoritmo funcione no se tiene en cuenta para mejorar el tiempo de espera en cada punto. Fue probado con abastecimiento para 20, 50 y 100 clientes, los resultados son aceptables en agrupaciones específicas de clientes, la técnica de minería como operador de movimiento es una nueva herramienta a usar y explorar en siguientes trabajos.

Dado lo anterior se evidencia que la literatura existente no muestra una solución logística aplicable no solo en la teoría, que involucre la adaptación de algoritmos genéricos y el uso de herramientas de geolocalización para optimizar un conjunto de rutas, es por eso que la solución planteada en este trabajo aporta al campo logístico y plantea una optimización en un sector donde la tecnología siempre ha estado al servicio de la seguridad y poco en la búsqueda de hacer un uso racional de los recursos para mejorar los márgenes operativos.

4. Objetivos (uno general, 3 específicos)

Diseñar un modelo de optimización de ruteo dinámico, aplicado al servicio de transporte de valores desde y hacia los clientes en la ciudad de Bogotá.

4.1 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual del modelo de transporte aplicado por la empresa para la definición de las rutas óptimas.
- Realizar una revisión literaria que contemple los algoritmos existentes para problemas de ruteo dinámico,
- Proponer un sistema de decisión de rutas óptimas que contemple las restricciones que impactan diariamente las rutas.

5. Metodología

Para este trabajo se propone hacer una investigación de los posibles modelos de ruteo dinámico con ventanas de tiempo que tengan la capacidad de incorporar restricciones de tráfico en tiempo real, variación en capacidad, demanda y múltiples depósitos. Esta información sería útil para describir una simulación que compare un día de trabajo real vs el modelo propuesto. Los términos de comparación serán el número de recursos utilizados, el número de servicios atendidos por hora, el nivel de cumplimiento en la llegada dentro del rango establecido y los kilómetros recorridos.

Problema de optimización combinatoria es aquel en el cual se tienen una función objetivo a minimizar que puede ser lineal o no lineal. Las posibles soluciones toman valores discretos y reales, formando el espacio de soluciones posibles que satisfacen ciertas restricciones. Muchas técnicas de optimización son iterativas, es decir comienzan con una solución inicial (factible o infactible) y construyen una nueva solución (solución actual). El proceso continua hasta encontrar la solución óptima o cumplir un criterio de parada.

Si se entiende el problema como un grafo, entonces el proceso iterativo de solución es un camino en un grafo $G=(V;A)$, donde el conjunto de nodos V es el conjunto de soluciones posibles en S . Donde A es un conjunto de pares, denotados por (x, x') , que se denominan lados, aristas, etc. Y donde un arco $(x,x') \in A$ existe si y sólo si x' pertenece al vecindario de la solución x .

En este artículo se propone usar el método de búsqueda tabú. El cuál permite moverse a una solución que puede no ser mejor que la actual, pero que permite escapar de óptimos locales para buscar soluciones mejores (Riojas y Álvarez, 2005).

6. Modelo de MDVRPTW

El MDVRPTW (multi-depot vehicle routing problem with time windows) consiste en determinar un conjunto de rutas de vehículos de tal manera que (Giosa, 2002):

- cada ruta comience y termine en el mismo depósito;
- todos los requisitos del cliente se cumplen exactamente una vez por un vehículo;
- se respetan los plazos para los clientes y los depósitos;
- la suma de todos los requisitos satisfechos por cualquier vehículo no excede su capacidad;
- se minimiza el costo total.

El MDVRPTW puede verse como resuelto en dos etapas: primero, los clientes deben ser asignados (asignados) a los depósitos; entonces se deben construir rutas que vinculen a los clientes asignados al mismo depósito (Polacek, 2004). Idealmente, se obtienen mejores resultados al tratar los dos pasos simultáneamente. Si se enfrentan a problemas más grandes, digamos 1000 clientes o más, este enfoque ya no es manejable computacionalmente. Un enfoque razonable sería dividir el problema en tantos subproblemas como depósitos y resolver cada subproblema por separado (Giosa, 2002).

6.1 Formulación matemática modelo de MDVRPTW

6.1.1 Objetivos y restricciones

Las restricciones de un problema VRPTW son (Thanh et al., 2017):

- Cada cliente se asigna en una sola ruta.
- Cada vehículo no puede cargarse más de su capacidad Q .
- Cada vehículo abandona la ubicación de depósito 0, después de visitar al cliente, finaliza su ruta devolviendo el depósito a la ubicación $n + 1$.
- El punto de tiempo para la entrega en cada cliente debe estar dentro del intervalo de tiempo de este cliente

La función objetivo debe minimizar estos tres aspectos, dando prioridad a algunos sobre otros según sea el objetivo (Thanh et al, 2017):

- Número mínimo de vehículos usados.
- Minimizar la distancia total de viaje.
- Minimizar el tiempo de espera para abastecer a todos los clientes.

6.1.2 Formulación matemática

El VRPTW se define como un grafo dirigido $G = (V, A)$, donde $V = \{k1, k2 \dots\}$ es el conjunto de elementos homogéneo de vehículos. A es el conjunto de ubicaciones que tiene 0 como ubicación de depósito y $n + 1$ como ubicación de retorno. C es el conjunto de ubicaciones del cliente.

x_{ijk} es una variable binaria, será 1 si el vehículo k viaja de i a j , y 0 en caso contrario.

Cada arco (i, j) con $i \neq j$ es la ruta de viaje del cliente i al cliente j y está asociado con c_{ij} como costo de viaje y t_{ij} como tiempo de viaje. Q es la capacidad del vehículo y d_i se representa como demanda del cliente i .

La ventana de tiempo $[e_i, l_i]$ del el cliente i , define la hora más temprana e_i y la última hora l_i en la cuál se debe atender al cliente. Esta ventana de tiempo restringe el tiempo de llegada del vehículo al lugar del cliente pues debe estar antes de l_i . Si el vehículo llega antes de e_i , debe esperar hasta e_i para atender al cliente i con el tiempo de servicio indicado por s_i . T_{ik} es el punto de partida del servicio para llegar al cliente i .

$[e_0, l_0]$ y $[e_{n+1}, l_{n+1}]$ son la ventana de tiempo en la ubicación de depósito y de retorno. El vehículo debe salir del depósito. ubicación y regreso dentro de e_0 y l_{n+1} .

La formulación del VRPTW se presenta a continuación Thuan et al., 2017):

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} c_{ij} x_{ijk} \quad i \neq j$$

Sujeto a

- (C1) $\sum_{k \in V} \sum_{j \in A} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C$
 (C2) $\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in A} x_{ijk} \leq Q \quad \forall k \in V$
 (C3) $\sum_{j \in A} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in V$
 (C4) $\sum_{i \in A} x_{ihk} - \sum_{j \in A} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C \text{ y } \forall k \in V$
 (C5) $\sum_{i \in A} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in V$
 (C6) $x_{ijk}(T_{ik} + s_i + t_{ij} - T_{jk}) \leq 0, \quad \forall k \in V, \forall i, j \in A$
 (C7) $e_i \leq T_{ik} \leq l_i, \forall k \in V, \forall i \in A$
 (C8) $x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall k \in V, \forall i, j \in A$

Las restricciones C1 y C2 se relacionan con R1 y R2, es decir cada cliente se asigna en una sola ruta y cada vehículo no puede cargarse más de su capacidad Q. Las restricciones C3, C4, C5 se relacionan con la restricción R3, que indica que cada vehículo abandona la ubicación de depósito 0, después de visitar al cliente, finaliza su ruta devolviéndose al depósito a la ubicación n + 1. Por último, C8 indica el valor binario de x_{ijk}

6.1.3 Solución búsqueda Tabú

El algoritmo de la búsqueda tabú que debe usarse para resolver el problema planteado en este artículo se describe a continuación:

<p>Generar solución inicial x_0 $k := 1$. $x = x_0$. (x es la solución actual)</p> <p>MIENTRAS la condición de finalización no se encuentre</p> <p>HACER:</p> <p>Identificar $N(x)$. (Vecindario de x) Identificar $T(x,k)$. (Lista Tabú) Identificar $A(s,k)$. (Conjunto de Aspirantes) Determinar $N^*(x,k) = \{N(x) - T(x,k)\} \cup A(x,k)$. (Vecindario reducido) Escoger la mejor $x \in N^*(x,k)$ "Guardar" x si mejora la mejor solución conocida $x_k := x$. Actualizar la lista tabú $k := k+1$.</p> <p>FIN MIENTRAS</p>
--

Fuente: Riojas y Álvarez (2005).

El propósito de la lista Tabú es prevenir el regreso al antiguo espacio de búsqueda o los movimientos antiguos generados por el generador de vecindario. Una vez que los movimientos generados se almacenan en la lista tabú, se mantendrá durante varias iteraciones, lo que se denomina

tenencia tabú. La lista tabú es la lista de las posibles soluciones que no pueden ser elegidas en la actual iteración.

Los criterios de aspiración son para eliminar algunos movimientos tabú que podrían obtener la mejor solución.

Por último, con la búsqueda Tabú se evalúa soluciones y se mueve a una mejor solución pero, considerando el entorno reducido $N^*(x)$, que son aquellas soluciones disponibles (no tabú) del entorno de x.

7. Conclusiones

El problema de enrutamiento del vehículo (VRP) implica el diseño de un conjunto de vehículo de costo mínimo rutas, que se originan y terminan en un depósito central, para una flota de vehículos que atiende a un conjunto de clientes con conocidos demandas.

Cada cliente recibe servicio exactamente una vez y, además, todos los clientes deben ser asignados a vehículos sin exceder las capacidades del vehículo. En la ruta del vehículo problema con restricciones de ventanas de tiempo (VRPTW), el los problemas deben abordarse bajo la complejidad añadida de tiempos de entrega permitidos, o ventanas de tiempo, derivadas del hecho de que algunos clientes imponen plazos de entrega y restricciones de tiempo de entrega más tempranas.

Mientras que el VRP y el VRPTW se han estudiado ampliamente, el problema de enrutamiento de vehículos de varios depósitos con ventanas de tiempo (MDVRPTW) ha atraído menos atención.

En el MDVRPTW, los clientes deben ser atendidos desde uno o varios depósitos. Al igual que con el VRP, cada vehículo debe salir y regresar al mismo depósito y el tamaño de la flota en cada el depósito debe oscilar entre un mínimo y un máximo especificados. El MDVRPTW es NP-hard, 1,2 por lo tanto, el desarrollo de algoritmos heurísticos para esta clase de problema es de interés primario.

Los productos a entregar se cargan en el depósito y los productos recogidos se transportan de regreso al depósito. Entonces, cada ruta del vehículo debe comenzar y terminar

en la terminal asignada y se deben cumplir las restricciones de capacidad del vehículo y tiempo de trabajo satisfecho.

Además, cada cliente debe ser atendido por exactamente un vehículo, ya que la demanda dividida es no permitida. Esta clase de problemas logísticos generalmente se conoce como el problema de enrutamiento del vehículo (VRP) y su objetivo suele ser la minimización de la distancia total recorrida por los vehículos mientras atendiendo a todos los clientes. El interés en VRP los problemas también provienen de su relevancia práctica a partir de la considerable dificultad para resolverlos exactamente.

8. Referencias

Aguilar, A. G. (2004). *Procesos metropolitanos y grandes ciudades*. Ciudad de México: La H. Cámara de diputados.

Anaya Tejero, J. J. (2015). *El Transporte de Mercancías* (2 ed.). Madrid: Esic Editorial.

Arnau, Q., Angel, J. A., & Serra, I. (2018). On the Use of Learnheuristics in Vehicle Routing Optimization Problems with Dynamic Inputs. *Algorithms*.

Fu, Q., Zhou, K., Qi, H., & Jiang, F. (2018). A Modified Tabu Search Algorithm to Solve Vehicle Routing Problem. *Journal of Computers*.

Geetha, S., Vanathi, P. T., & Poonthalir, G. (2012). METAHEURISTIC APPROACH FOR THE MULTI-DEPOT VEHICLE ROUTING PROBLEM. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*.

Guibing, G., Hongbo, Z., & Daobing, Z. (2012). The Optimization of Materials Distribution Routing Plan in the Flow Manufacturing System Based on Multi-objective Evolutionary Algorithm. *International Conference on Computer Science and Network Technology*.

Kok, A., Hans, E., Schutten, J., & Zijm, W. (2010). A dynamic programming heuristic for vehicle routing with time-dependent travel times and required breaks. *Flexible Services and Manufacturing Journal volume* , 83-108.

Liu, Z., Zhou, K., Jiang, F., & Zhen, Y. (2017). Application of MTabu in VRPTW. *International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC)*.

Mitsuo, G., Green, D., Katai, O., Mckay, B., Namatame, A., Sarker, R. A., & Tak Zhang, B. (2009). *Intelligent and Evolutionary Systems*. Berling: Springer.

Nasser R, S., Bashkar, A., Chung, E., Turkey, A., & Song, A. (2019). A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion. *Elsevier*.

Ouaddi, K., Benadada, Y., & Mhada, F. Z. (2018). Ant Colony System for Dynamic Vehicle Routing Problem with Overtime. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*.

Raj, R., Babu, S., Benson, K., Jain, G., Manoj, B. S., & Venkatasubramanian, N. (2015). Efficient Path Rescheduling of Heterogeneous Mobile Data Collectors for Dynamic Events in Shanty Town Emergency Response.

Riojas, A., & Álvarez, M. (2005). Búsqueda tabú: conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las n-reinas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Facultad de Ciencias Matemáticas. EAP. de Investigación Operativa.

Rojas Mejias, J. A. (2012). *Heurística basada en cobertura y generación de columnas dinámicas para el problema de ruteo dinámico de vehículos con ventanas de tiempo*. Santiago .

Sarmiento Lapesqueur, A. (2014). Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la meta-heurística Búsqueda Tabú. *Tesis*. Bogotá.

Thanh, D. D., Thuan, N. D., & Phat, N. T. (2017). IMPROVED TABU SEARCH ALGORITHM FOR VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS. *Décima Conferencia Nacional sobre Investigación Básica y Aplicación de Tecnología de la Información (FAIR)*. Da Nang.

Zeimpekis, V., Tarantilis, C. D., George, G. M., & Loannis, M. (2007). *Dynamic Fleet Management*. Atenas: Springer.

