

Solución al Problema de Enrutamiento de Vehículos Eléctricos (eVRP)

Simón Correa Henao
Universidad Eafit
Colombia
scorreah@eafit.edu.co

David Gómez Correa
Universidad Eafit
Colombia
dgomez10@eafit.edu.co

Mauricio Toro
Universidad Eafit
Colombia
mtorobe@eafit.edu.co

RESUMEN

Entre los problemas más importantes a resolver en el siglo 21 se encuentra la emisión de gases invernadero debido a, entre muchas causas, la fuerte dependencia de los vehículos que funcionan a partir del petróleo. Para solventar este problema se ha iniciado el estudio para la implementación de vehículos eléctricos en todo tipo de actividades humanas, entre las cuales está la repartición o envío de paquetes. Sin embargo, nuestro problema surge debido a que estos vehículos tanto para carga como pasajeros, requieren de una constante recarga de batería, por lo que su rango de conducción es limitado. Este problema se relaciona con algunos otros problemas algorítmicos como son: TSP, VRP y eVRP.

Palabras clave

eVRP, Algoritmos, Clark-Wright, VRP, Método de Ahorros

Palabras clave de la clasificación de la ACM

Ejemplo: Theory of computation → Design and analysis of algorithms → Graph algorithms analysis → Shortest paths Computing methodologies → Artificial intelligence → Planning and scheduling → Planning under uncertainty

1. INTRODUCCIÓN

Es la justificación de las condiciones en el mundo real que llevan al problema. En otras palabras, es hablar sobre qué va a tratar el documento e incluir la historia de este problema.

Las energías limpias en la actualidad se han convertido en un pilar fundamental dentro de la lucha contra el calentamiento global y la mala calidad de vida. El remplazo de los automóviles que funcionan con combustible fósil a lo largo del mundo es una realidad, y Colombia no es la excepción, ciudades como Medellín se encuentra en una época de transición, renovando sus articulados a vehículos eléctricos, creando una flota de taxis eléctricos, y además, dándole incentivos a sus ciudadanos para el cambio de sus vehículos a energías limpias.

Día a día miles de vehículos de transporte de carga realizan rutas a lo largo y ancho del país. Para las empresas es de

suma importancia hacer parte de este cambio, no solo por la emergencia ambiental que se vive en el momento, si no, además por los beneficios que esto les traería.

2. PROBLEMA

Considerando de antemano las grandes repercusiones que ocasionan los vehículos que usan combustible fósil, como lo son el decaimiento en la calidad del aire y el calentamiento global, el problema que tienen las empresas para este cambio generacional radica en la falta de infraestructura en las ciudades (estaciones de carga eléctrica), por ende, la planeación logística para las rutas de transporte debe ser lo más eficiente posible.

Esta eficaz parte de armonizar factores como lo son la cantidad de clientes a recorrer, los puntos de carga, la flota disponible en el momento y los horarios laborales, de tal manera que sea posible crear rutas capaces de cumplir con todos estos requerimientos de la mejor manera.

Considerando lo anterior puede llegar a ser oportuno encontrar una solución capaz de crear rutas, teniendo en cuenta todas las limitaciones anteriormente mencionadas, para así, ayudar a las empresas a lograr este cambio generacional tan requerido y reducir los vehículos que usan energías fósiles, para así detener la emergencia ambiental actual

3. TRABAJOS RELACIONADOS

Aquí deberán explicar 4 problemas algorítmicos similares que se encuentren documentados en libros, artículos científicos o sitios web, y dar al menos 1 solución para uno de ellos. NO poner soluciones de tecnología.

3.1 Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases

El problema abordado por Julio Mario, Jairo Montoya y Francesco Narducci es plantear una solución al problema de enrutamiento de vehículos con límites de capacidad, dividiendo este en dos fases: la primera de diseño de rutas y la segunda sobre la planificación de la flota. Para la solución de la primera parte utilizan el algoritmo k-opt, obteniendo de esta manera una complejidad de todo el algoritmo de $O(n \log n)$, obteniendo resultados sólidos y constantes.

3.2 A Vehicle Routing Problem with a Time Windows Approach to Improve the Delivery Process

Pineda y Carabalí encaran el Problema del Enrutamiento de Vehículo, de sus siglas en inglés VRP. Esto lo hacen utilizando el programa VRP SOLVER 3.0 que a su vez se sirve del algoritmo conocido como Heurística Estocástica de Clarke-Wright. Es importante tener en cuenta que, aunque puede variar debido a su aplicación e implementación el algoritmo de Clarke-Wright cuenta con una complejidad en tiempo de $O(n^3)$.

3.3 Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou Paris

La temática abordada por Andrés Felipe en su artículo, consta de plantear un modelo de ruteo para distribución de productos, planteando este mismo en dos fases: una inicial en la que se esboza el mapa y una segunda para generar todas las rutas. El algoritmo utilizado para darle solución a este problema fue el de Tabu, que plantea una posible solución y posteriormente busca una mejor, si es el caso. Los resultados obtenidos priorizan un menor tiempo en cada recorrido.

3.4 A novel heuristic algorithm based on Clark and Wright Algorithm for Green Vehicle Routing Problem

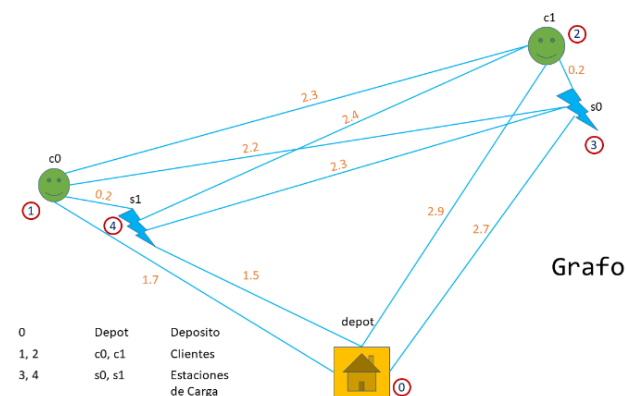
Como su título lo indica, Mehdi Alinaghian, Zahra Kaviani y Siyavash Khaledan utilizaron el método de ahorros o más conocido como Algoritmo de Clark-Wright, para abordar el problema del GVRP (Green Vehicle Routing Problem). Este consiste en aplicar las mismas bases del método de ahorros de Clark & Wright, tomando en cuenta principalmente restricciones enfocadas a reducir el costo de las rutas en términos de consumo de combustible, considerando todos sus factores relacionados.

4. Solución con el método de ahorros para ruteo de vehículos

A continuación, explicamos la estructura de datos y el algoritmo.

4.1 Estructura de datos

Matriz de adyacencia



Grafo

	Depot	c0	c1	s0	s1
Nodos	0	1	2	3	4
0	0.0	1.7	2.9	2.7	1.5
1	1.7	0.0	2.3	2.2	0.2
2	2.9	2.3	0.0	0.2	2.4
3	2.7	2.2	0.2	0.0	2.3
4	1.5	0.2	2.4	2.3	0.0

Pesos

Matriz de Adyacencia

Gráfica 1: Matriz de adyacencia con las distancias entre nodos. Cada nodo representa o el depósito o un cliente o una estación de carga. Primero se guarda el depósito y todos los clientes en la matriz y luego todas las estaciones de carga

4.2 Operaciones de la estructura de datos

- **addArc:** Agrega una conexión entre dos vértices a la matriz. El método recibe el nodo origen, el nodo destino y el peso entre los nodos.

origen destino peso
addArc(0, 0, 10.0)

	Depot	c0	c1	s0	s1
Nodos	0	1	2	3	4
0	10	1.7	2.9	2.7	1.5
1	1.7	0.0	2.3	2.2	0.2
2	2.9	2.3	0.0	0.2	2.4
3	2.7	2.2	0.2	0.0	2.3
4	1.5	0.2	2.4	2.3	0.0

Pesos

Matriz de Adyacencia

- **getWeight:** Entrega el peso del arco entre un vértice origen y un vértice destino. El método recibe como parámetros el vértice origen y el vértice destino

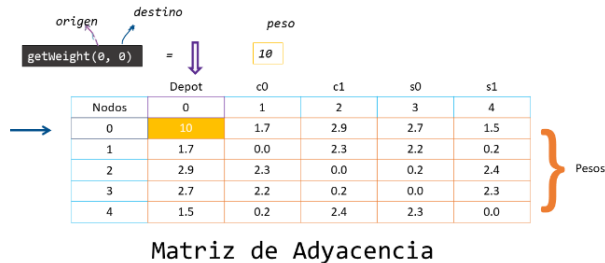
Nodo
getSuccessors(0) = [1, 2, 3, 4]

	Depot	c0	c1	s0	s1
Nodos	0	1	2	3	4
0	0	1.7	2.9	2.7	1.5
1	1.7	0.0	2.3	2.2	0.2
2	2.9	2.3	0.0	0.2	2.4
3	2.7	2.2	0.2	0.0	2.3
4	1.5	0.2	2.4	2.3	0.0

Pesos

Matriz de Adyacencia

- **getSuccessors:** Entrega la lista de los sucesores de un vértice o nodo. El método recibe el número del nodo.



Gráfica 2: Imágenes de las operaciones sobre la matriz de adyacencia.

4.3 Criterios de diseño de la estructura de datos

Para la escogencia de la estructura de datos principal del algoritmo, es decir la matriz de adyacencia que representa el grafo completo no dirigido, se tomó como prioridad el tiempo de ejecución. Teniendo en cuenta que la operación de búsqueda con la matriz de adyacencia se completa en un tiempo de ejecución de $O(1)$, esto significó una gran ventaja a la hora de operar con el algoritmo.

Además de utilizar esta estructura se utilizó una matriz para almacenar los ahorros, es decir lo que se ahorra en tomar una ruta pasando por una cierta pareja de nodos, en comparación con que si sumara lo que cuesta hacer un viaje individualmente por cada nodo. Cabe mencionar que esta estructura es equivalente y se maneja de la misma manera, con operaciones internamente iguales, que la matriz de adyacencia que se ha venido explicando.

4.4 Análisis de Complejidad

Método	Complejidad
Constructor de RuteoVehiculosElectricos (Lectura de los datos)	$O(N^2)$
Ahorros (creación de tabla)	$O(N^2)$

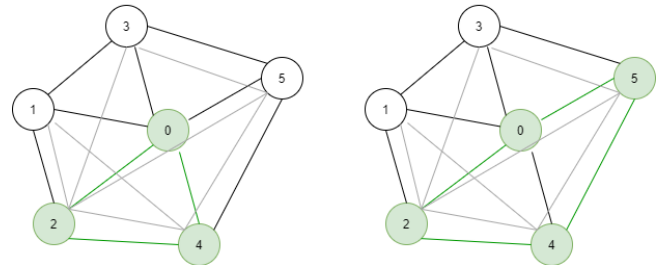
Tabla 1: Tabla para reportar la complejidad en tiempo relacionada con la estructura de datos utilizada

4.5 Algoritmo

Algoritmo de ahorros Clark y Wright (VRP)

2-4	4-5	1-5	1-2	3-5	1-3
78	60	50	45	43	42

2-4	4-5	1-5	1-2	3-5	1-3
78	60	50	45	43	42



Gráfica 3: Paso a paso como escoger la ruta con el criterio de ahorros o algoritmo de Clark-Wright (VRP)

4.6 Cálculo de la complejidad del algoritmo

Sub problema	Complejidad
Crear la matriz de ahorros	$O(N^2)$
Añadir un camino a la lista de registro	$O(1)$
Método para validar si se puede realizar el camino	$O(N)$
Método para eliminar los ahorros de los clientes visitados	$O(N^2)$
Método calculador de ruta	$O(N^3)$
Complejidad Total	$O(N^3)$

Tabla 2: complejidad de cada uno de los subproblemas que componen el algoritmo. Sea N el número de clientes a visitar, y M el número de estaciones de carga

4.7 Criterios de diseño del algoritmo

El algoritmo de Clark y Wright, más conocido como el algoritmo de los ahorros, fue escogido primero porque la ruta que este genera tiene altas posibilidades de ser la óptima, a su vez el algoritmo en sí, para los data sets planteados, realiza los cálculos y genera una ruta en poco tiempo, dada su complejidad, aunque sacrificar un mayor consumo de memoria.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal del algoritmo consistía en priorizar el tiempo en que este lograba generar el ruteo de vehículos, se decidió priorizar el tiempo. Por dicho motivo el algoritmo de Clark-Wright, que se comporta como un voraz, fue escogido para la solución al problema.

4.8 Tiempos de Ejecución

	<i>Conjunto de Datos 1</i>	<i>Conjunto de Datos 2</i>	<i>Conjunto de Datos 3</i>
<i>Mejor caso</i>	1 seg	0.8 seg	1.3 seg
<i>Caso promedio</i>	3.5 seg	3.4 seg	3 seg
<i>Peor caso</i>	6 seg	5.5 seg	6.3 seg

Tabla 3: Tiempos de ejecución del algoritmo con diferentes conjuntos de datos, *Datos 1* con 320 clientes, *Datos 2* con 345 clientes, *Datos 3* con 359 clientes

4.9 Memoria

	<i>Conjunto de Datos 1</i>	<i>Conjunto de Datos 2</i>	<i>...Conjunto de Datos n</i>
Consumo de memoria	0.8 MB	0.8 MB	0.8 MB

Tabla 4: Consumo de memoria del algoritmo con diferentes conjuntos de datos. Datos 1 con 320 clientes, datos 2 con 345 clientes, datos 3 con 359 clientes

4.10 Análisis de los resultados

Memoria (KB)	Tiempo de ejecución (secs)	No. Clientes	No. Camiones	Tiempo total de las rutas
871	1	320	33	159
826	3.5	320	27	95
826	6	320	29	119
825	5	320	33	159
825	5	320	27	95
825	4	320	29	119

825	7	320	33	159
825	7	320	27	95
825	3.5	320	29	120
826	5	320	33	159
825	6	320	27	95
826	6.5	320	29	119

Tabla 5: Análisis de los resultados obtenidos con la implementación del algoritmo

REFERENCIAS

1. Alinaghian, M., Kaviani, Z., Khaledan, S. 2015. *A Novel Heuristic Algorithm Based on Clark and Wright Algorithm for Green Vehicle Routing Problem*. International Journal of Supply and Operations Management, 2(2). 784–797.
2. Carabalí, H. and Pineda, U. 2020. *Un Problema de Enrutamiento del Vehículo con Enfoque de Ventanas de Tiempo para Mejorar el Proceso de Entregas*. Ingeniería (0121-750X).
3. Daza, J., Montoya, J. and Narducci, F., 2009. *RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS CON LIMITACIONES DE CAPACIDAD UTILIZANDO UN PROCEDIMIENTO METAHEURÍSTICO DE DOS FASES*. 12th ed. Medellin: Escuela de Ingeniería de Antioquia, pp.23-34.
4. Mediorreal, A., 2014. *Modelo de ruteo de vehículos para la distribución de las empresas Laboratorios Veterland, Laboratorios Callbest y Cosméticos Marliou Paris*. UNIVERSIDAD JAVERIANA.