

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
dgomezcl0@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.

Para solucionar este problema se plantea un algoritmo, que considerando diferentes variables como lo son tiempo y batería, sea capaz de plantear rutas lo más eficientes posible. Los resultados arrojados al evaluar dicho algoritmo muestran un grado fiabilidad bastante alto, teniendo en cuenta que probablemente esta no sea la mejor solución; por tal motivo se puede concluir que el algoritmo plantea una posible solución al problema fiable y que permite mejorar la autonomía de los vehículos eléctricos.

Palabras clave

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

Palabras clave de la clasificación de la ACM

Computing methodologies → Artificial intelligence → Planning and scheduling → Planning under uncertainty

Computing methodologies → Symbolic and algebraic manipulation → Symbolic and algebraic algorithms → Optimization algorithms

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

En pocas palabras escriban cuál problema que están resolviendo, además de responder ¿para qué resolver este 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 eficacia 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 Franceso 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

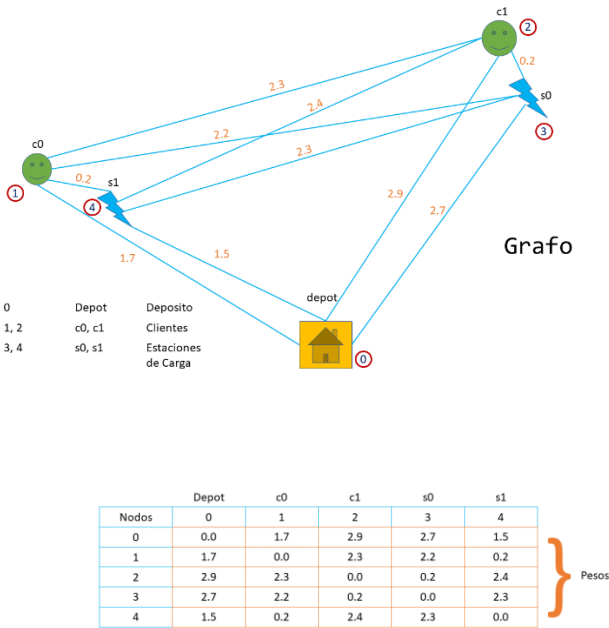
Como su título lo indica, Mehdi Alinaghian, Zahra Kaviani y Siyavash Khaledan utilizaron el método de ahorros o más conocido como Algoritmo de Clark-Wright, para abordar el problema del GVRP (Green Vehicle Routing Problem). Este consiste en aplicar las mismas bases del método de ahorros de Clark & Wright, 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

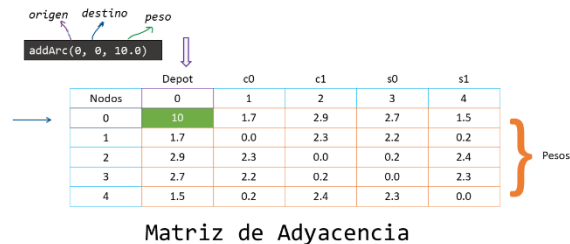


Matriz de Adyacencia

Gráfica 1: Matriz de adyacencia con las distancias entre nodos. Cada nodo es 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.

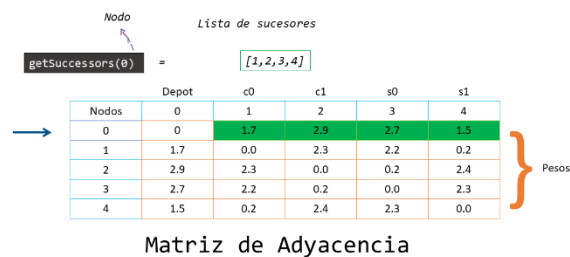


grafo completo no dirigido, se tomó como prioridad el tiempo de ejecución. Teniendo en cuenta que la operación de búsqueda con la matriz de adyacencia se completa en un tiempo de ejecución de $O(1)$, esto significó una gran ventaja a la hora de operar con el algoritmo.

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

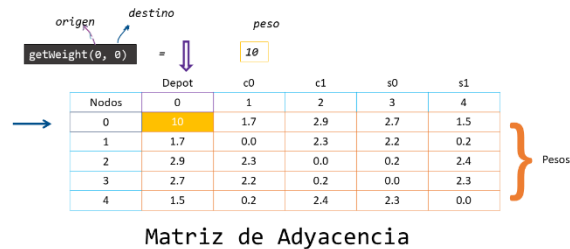
- **getWeight:** Entrega el peso del arco entre un vértice origen y un vértice destino. El método recibe como parámetros el vértice origen y el vértice destino



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

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

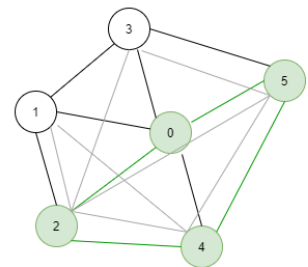
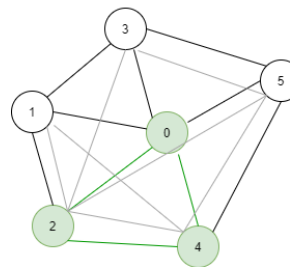


4.5 Algoritmo

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)

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

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

	Conjunto de Datos 1	Conjunto de Datos 2	Conjunto de Datos 3
<i>Mejor caso</i>	18 ms	18 ms	14 ms
<i>Caso promedio</i>	99 ms	43 ms	61 ms
<i>Peor caso</i>	181 ms	69 ms	108 ms

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

	Conjunto de Datos 1	Conjunto de Datos 2	Conjunto de Datos 3
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

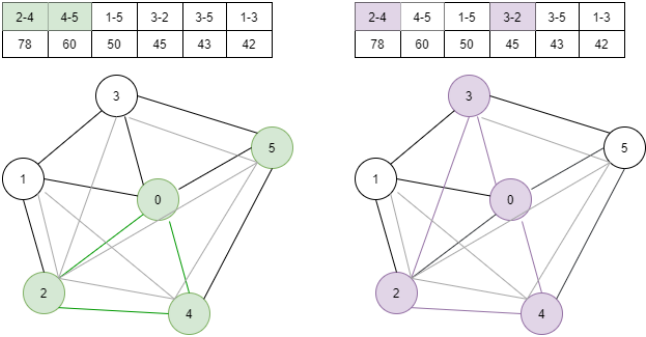
4.10 Análisis de los resultados

Memoria (KB)	Tiempo de ejecución (ms)	No. Clientes	No. Camiones	Tiempo total de las rutas
959	181	320	57	471
957	69	320	51	330
957	108	320	60	453
956	67	320	57	473
958	85	320	51	335
956	83	320	60	453
1034	178	320	57	455
1036	61	320	61	330
1035	73	320	58	402
1034	62	320	57	452
1036	77	320	51	336
1034	78	320	58	419

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

5. Random Clark Wright Algorithm

5.5 Algoritmo



Gráfica 6: Algoritmo de Clark y Wright (VRP) modificado para incluir la aleatoriedad.

5.6 Cálculo de la complejidad del algoritmo

Sub problema	Complejidad
Crear la matriz de ahorros	$O(N^2)$
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 7: 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

5.7 Criterios de diseño del algoritmo

Como base principal del algoritmo se utilizó el método de ahorros, más conocido como el algoritmo de Clark y Wright. Se toma dicho algoritmo debido a sus altas posibilidades de retornar una ruta fiable, además de que su complejidad en tiempo permite realizar dichos cálculos en un tiempo considerablemente bajo.

En busca de alternativas para mejorar las rutas que genera dicho algoritmo voraz, se plantea la aleatoriedad dentro del mismo, con el fin de encontrar posibles soluciones con mejores resultados y de esta manera escoger la mejor. Dado que el objetivo final era encontrar soluciones en el menor tiempo posible, este algoritmo era el más óptimo y aprovechando la brecha de tiempo con que se contaba, se

plantea la aleatoriedad dentro del mismo, para así brindar la mejor solución posible.

5.8 Tiempos de Ejecución

	Conjunto de Datos 1	Conjunto de Datos 2	Conjunto de Datos 3
Mejor caso	25 ms	22 ms	29 ms
Caso promedio	114 ms	55 ms	476 ms
Peor caso	204 ms	88 ms	924 ms

Tabla 8: Tiempos de ejecución del algoritmo con diferentes conjuntos de datos (en milisegundos)

5.9 Memoria

	Conjunto de Datos 1	Conjunto de Datos 2	Conjunto de Datos 3
Consumo de memoria	0.9 MB	0.9 MB	1 MB

Tabla 9: Consumo de memoria del algoritmo con diferentes conjuntos de datos

5.10 Análisis de los resultados

Memoria (KB)	Tiempo de ejecución (ms)	No. Clientes	No. Camiones	Tiempo total de las rutas
965	301	320	51	360
957	168	320	48	290
956	125	320	52	342
957	120	320	51	368
958	194	320	48	299
956	105	320	52	346
1035	86	320	51	346
1036	90	320	47	292
1034	95	320	48	305
1035	101	320	50	339
1035	370	320	47	295
1034	148	320	49	315

Tabla 10: Análisis de los resultados obtenidos con la implementación del algoritmo

6. CONCLUSIONES

El paso de las energías fósiles a las energías renovables está cada vez más cerca, a su vez que el encontrar el equilibrio para que este traspaso se cumpla de manera correcta y lo más eficientemente posible. Es evidente que en cuanto a autonomía hablamos, es incierto plantear “la mejor solución” (esta nadie la conoce), por ende, su búsqueda es de suma importancia y relevancia para el futuro tanto de las empresas, como de la vida cotidiana en sí misma.

En búsqueda de dicha solución, el algoritmo de Clark con diferentes modificaciones (como la aleatoriedad), puede ser la clave en la búsqueda de dicha autonomía. Los resultados arrojados en forma de rutas cumplen con los requerimientos básicos, además de dar ese plus de optimización que hace que sean bastante fiables al momento de su aplicación. Pese a esto, es importante saber que no siempre van a ser las mejores rutas o soluciones y aunque no se puedan plantear como las mejores, pueden tender a acercarse a ellas.

El algoritmo base, dada su naturaleza, plantea soluciones de manera muy rápida, dando la posibilidad de evaluar y comparar dichas soluciones con otras, para idealmente escoger la mejor. Al compararlo con trabajos relacionados, encontramos puntos en los que superaba los resultados obtenidos, pero a su vez muchos en los que la solución era peor de la que estos planteaban. La evolución del algoritmo al incluir la aleatoriedad como una forma de mejora, le permitió ser cada vez más evolutivo en sus resultados y permitiéndole comparar resultados unos con otros, llevándolo a mejorar sus argumentos al momento de escoger una solución final.

La evolución del algoritmo voraz desarrollado sirviéndose de métodos distintos de búsqueda local, comparando con soluciones varias por ejemplo de back-tracking, podría permitir encontrar soluciones aún más óptimas; es importante resaltar que el plantear más soluciones es la manera correcta para escoger la ruta más adecuada, puesto que el plantear más rutas aumentaría la probabilidad de encontrar una mejor que la anterior y de esta manera llevar cada vez más cerca el algoritmo a la perfección. Por otro lado, la batería se presenta como el principal impedimento, puesto que estas aún se encuentran en Desarrollo y causan que las soluciones estén en constante cambio.

6.1 Trabajos futuros

Evolucionar el algoritmo por medio de métodos de Búsqueda Local es el principal objetivo a futuro, además del comparar con soluciones varias de back-tracking, esto último dado que el evaluar más rutas aumenta la probabilidad de encontrar

una mejor solución. Otro aspecto clave a mejorar es la complejidad del algoritmo mismo, puesto que aunque con data set pequeños, como lo trabajados, el tiempo algorítmico es bajo, para data sets más grandes el tiempo de ejecución del problema aumentaría a gran escala.

Finalmente, otro trabajo futuro de gran relevancia pensando en la aplicabilidad del algoritmo, es por supuesto desarrollar o implementar un método para dibujar las rutas obtenidas, pensando que esto, además de darle peso y perspectiva a los resultados, también podría ser de suma importancia al momento de tomar decisiones dentro de las empresas que lo requieran.

AGRADECIMIENTOS

Le damos gracias a Jose Alejandro Montoya Echeverri por darnos la inspiración para mejorar el algoritmo de Clark Wright mediante la aleatorización y métodos de búsqueda local.

REFERENCIAS

1. 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).
2. 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. Medellín: Escuela de Ingeniería de Antioquia, pp.23-34.
3. 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.
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.