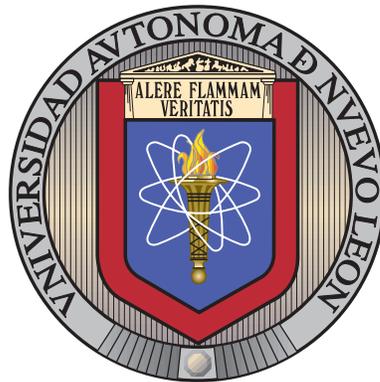


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



HEURÍSTICAS PARA EL PROBLEMA DE  
DETERMINACIÓN DE LA FUERZA DE VENTAS.

POR

DANIA DANIELLES SUÁREZ SUÁREZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



HEURÍSTICAS PARA EL PROBLEMA DE  
DETERMINACIÓN DE LA FUERZA DE VENTAS.

POR

DANIA DANIELLES SUÁREZ SUÁREZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Heurísticas para el problema de determinación de la fuerza de ventas.», realizada por el alumno Dania Danielles Suárez Suárez, con número de matrícula 1985272, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Sistemas.

El Comité de Tesis

Dr. Romeo Sánchez Nigenda

Asesor

Dra. María Angélica Salazar Aguilar

Revisor

Dr. Tomás Eloy Salais Fierro

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Julio 2020

*A mis padres y hermanos, por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera de estudiante y a lo largo de mi vida.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisión de la Literatura</b>	<b>5</b>
2.1. Problema de ruteo de vehículos . . . . .	6
2.2. Problema de tamaño de la fuerza de ventas . . . . .	9
<b>3. Descripción del problema</b>	<b>12</b>
3.0.1. Descripción del problema . . . . .	12
3.0.2. Formulación matemática . . . . .	13
<b>4. Descripción de la Metodología de Solución</b>	<b>18</b>
4.0.1. Construcción de una Solución Inicial . . . . .	19
4.0.2. Construcción de la Metaheurística . . . . .	21
<b>5. Experimentación Computacional</b>	<b>29</b>

ÍNDICE GENERAL	VI
<hr/>	
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>42</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	42
6.2. Trabajo Futuro . . . . .	43
<b>A. TABLAS DE RESULTADOS</b>	<b>44</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Representación clásica del VRP . . . . .	6
4.1. Algoritmo Propuesto . . . . .	18
4.2. Construcción de las rutas iniciales . . . . .	20
4.3. Heurística . . . . .	21
4.4. Heurística . . . . .	27
5.1. Instancias10. . . . .	31
5.2. Instancias12. . . . .	31
5.3. Instancias14. . . . .	32
5.4. Instancias16. . . . .	32
5.5. Instancias10. . . . .	34
5.6. Instancias12. . . . .	34
5.7. Instancias14. . . . .	35
5.8. Instancias16. . . . .	35
5.9. Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias10. . .	37
5.10. Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias12. . .	38

---

5.11. Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias14.	38
5.12. Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias16.	39

# ÍNDICE DE TABLAS

---

5.1. Características de la PC. . . . .	29
5.2. Costos Asociados . . . . .	30
5.3. Número de veces en las que el método reportó mejores valores de la función objetivo. . . . .	33
5.4. Tiempos de ejecución totales, en segundos, requeridos por el optimi- zador CPLEX y por el Constructivo. . . . .	33
5.5. Número de veces en las que el ALNS reportó mejores valores que el Constructivo. . . . .	36
5.6. Tiempos de ejecución totales, en segundos, requeridos por el optimi- zador CPLEX y por el Constructivo. . . . .	36
5.7. Número de veces en las que el método reportó mejores valores de la función objetivo. . . . .	39
5.8. Tiempos de ejecución totales, en segundos, requeridos por el optimi- zador CPLEX y por el ALNS. . . . .	40
5.9. Resultados del ALNS versus CPLEX . . . . .	41
A.1. Resultados para el conjunto de Instancias10 . . . . .	45
A.2. Resultados para el conjunto de Instancias10 . . . . .	46

---

A.3. Resultados para el conjunto de Instancias10 . . . . .	47
A.4. Resultados para el conjunto de Instancias10 . . . . .	48

# AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios.

También agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por permitirme formar parte de este posgrado.

A todos los profesores que forman este programa por los conocimientos brindados durante estos dos años, en especial a mi asesor de tesis Dr. Romeo Sánchez Nigenda por el apoyo brindado para la realización de la misma. A la Dra. María Angélica Salazar Aguilar y al Dr. Tomás Eloy Salais Fierro por aceptar ser los revisores de este trabajo.

A mis padres y hermanos por siempre apoyarme, y haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de los logros se los debo a ustedes, en los que incluyo este.

A mis compañeros de generación por todos los momentos que pasamos juntos.

# RESUMEN

---

Dania Danielles Suárez Suárez.

Candidato para el grado Maestría en Ciencias de la Ingeniería  
con Orientación en Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

## HEURÍSTICAS PARA EL PROBLEMA DE DETERMINACIÓN DE LA FUERZA DE VENTAS.

Número de páginas: 53.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** En este trabajo se propone el diseño de una metaheurística con el objetivo de mejorar la calidad de los resultados obtenidos hasta el momento, para el problema objeto de estudio, dado que es poco tratado en la literatura y se encuentra muy presente en la actualidad.

La metodología de investigación utilizada para dar cumplimiento a los objetivos propuestos es la siguiente:

- Revisión de la literatura relacionada con el problema objeto de estudio.
- Revisión y planteamiento de la formulación matemática la cual fue tomada de [26].

- Diseño de la metaheurística tipo ALNS (Búsqueda Adaptativa de Vecindarios Grandes).
- Experimentación computacional.
- Análisis de los resultados.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Este trabajo contribuye a encontrar una solución a una problemática de la vida real, con el método de solución planteado. Se puede concluir que con la aplicación del ALNS, se logra obtener soluciones de buena calidad en tiempos computacionales aceptables, por lo que el método de solución se puede considerar un aporte a la logística y a la optimización de procesos.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_



Dr. Romeo Sánchez Nigenda

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

El transporte se ha convertido en parte importante de la logística nacional en México, este busca optimizar procesos y ha logrado grandes cambios y mejoría en la tecnología, donde cada vez cuesta menos brindar un mejor servicio y se poseen mejores técnicas de entrega de producto.

Los problemas de ruteo de vehículos forman una parte importante en el área logística y el transporte de bienes; donde se puede afirmar que el costo de algunos productos depende de la forma en que estos se mueven a través del canal de distribución. La aplicación de la optimización en la ruta logística puede disminuir notablemente el costo del producto además de agregarle valor por concepto de entregas en tiempo.

El problema de ruteo de vehículos (VRP) es un problema de optimización combinatoria que consiste en brindar un servicio a un grupo de clientes ubicados geográficamente de forma dispersa; para esto se cuenta con uno o varios depósitos de donde parten los vehículos una vez que se les han asignado las rutas de clientes que deberán atender, de tal forma que se minimicen los costos de transporte.

Existen diferentes variantes del problema, en donde se incluyen restricciones y múltiples variables buscando una semejanza a problemas reales de ruteo, así como diferentes métodos de solución para el mismo. En este trabajo estudiaremos una de estas variantes *el problema de tamaño de la fuerza de venta* (SFSP) [26] en donde como su nombre lo indica se debe determinar el tamaño de la flota necesaria para

atender a los clientes en un horizonte de planificación.

El objetivo del presente trabajo es proponer una metaheurística para el problema de tamaño de la fuerza de ventas (sales force sizing problem, SFSP) con la que se pretende encontrar mejores resultados en comparación con los problemas estudiados de la literatura.

En la literatura este problema no ha sido muy estudiado, [26] presentan una heurística para el mismo compuesto por dos etapas; la primera etapa consiste en la obtención de una solución inicial y una segunda etapa de mejora donde primeramente se realiza una perturbación(shake) a la solución inicial y luego se le aplica una búsqueda. Los resultados obtenidos muestran que existe una mejora como promedio del 20% en la solución al aplicar cada elemento de la segunda etapa a la solución inicial, por lo que se puede encontrar como motivación encontrar mejores resultados a partir de la aplicación de una metaheurística al problema planteado; dado que este es un país que se viene preparando desde hace algunos años en el desarrollo logístico, por lo que son cada vez menos las empresas que carecen de tecnología para optimizar los procesos de la cadena de suministro lo que eleva el nivel de competitividad empresarial [26]. Esto conlleva a que la industria Logística crezca en los próximos años por lo que se debe asumir el reto de encontrar buenos sistemas que brinden la mejor solución para resolver los problemas; por lo que puede dar respuesta a un caso de la vida real presentado por alguna empresa de distribución de bienes ubicada en México [28].

Un problema (SFSP) conlleva a la toma de decisiones sobre vehículos, administración de personal, tiempo y otras variables importantes respecto de cómo, cuándo, dónde y a través de qué tipo de vehículo se debe atender algún cliente en el tiempo y la manera adecuada [17]. La transportación, representa un alto porcentaje de valor agregado de los productos y es por esto que la utilización de métodos computacionales puede brindar una solución que a pesar de que muchas veces no es la óptima si tiende a ser de gran utilidad para reducir los costos de transportación [9].

Brindar una respuesta, puede ser de gran aporte dado a que puede elevar la calidad del servicio al cliente respetando las ventanas de tiempo y a su vez se encuentran las mejores rutas donde se minimizan los costos de transportación; por lo que encontrar la mejor solución a este tipo de problema, puede aportar enormes ventajas competitivas a las entidades en el mercado [15].

El desarrollo de un metaheurística sería una continuidad a las investigaciones realizadas sobre SFSP que se han realizado anteriormente por [26], fortaleciendo los retos industriales y comerciales que existen en el presente y aportaría sin duda alguna al desarrollo de la tecnología logística [1].

### ***Objetivos:***

- Estudiar un problema poco tratado en la literatura que se presenta como un problema en la actualidad.
- Diseñar una metaheurística para mejorar la calidad de los resultados obtenidos hasta el momento para el problema objeto de estudio.
- Realizar experimentos computacionales para evaluar los resultados del algoritmo propuesto.

### ***Hipótesis***

Con la aplicación de una metaheurística se disminuye el costo de salario nominal para el problema (SFSP), mostrando resultados computacionales más eficientes que en la literatura.

### ***Estructura de la Tesis:***

La estructura del presente trabajo quedará conformada de la siguiente forma. En el presente capítulo se describe el objetivo de la investigación así como la justificación y se plantea la hipótesis.

**Capítulo 2:** Se realiza una revisión de la literatura relacionada con el problema objeto de estudio.

---

**Capítulo 3:** Se realiza la descripción del problema y de su formulación matemática.

**Capítulo 4:** Se realiza el diseño de la metaheurística.

**Capítulo 5:** Se realiza la experimentación computacional a partir de la metaheurística propuesta.

**Capítulo 6:** Conclusiones del trabajo y análisis de posibles estudios futuros de la investigación.

## CAPÍTULO 2

# REVISIÓN DE LA LITERATURA

---

Dentro del servicio logístico, la logística de distribución siempre ha sido de gran importancia ya que se encarga de gestionar de manera eficaz el transporte de mercancías, es decir se ocupa de las tareas relacionadas con la necesidad de situar los productos desde los centros de producción o distribución hasta los puntos de demandas, teniendo en cuenta las variables de seguridad, costo y tiempo.

Para poder atender ls demandas de los clientes, es necesario tomar decisiones operativas a través de los diseños de rutas, con las que se atenderán las exigencias de los mismos. Muchos sectores como el transporte público, la distribución y crecolección de mercancías o desechos entre otros comparten estas necesidades.

Una forma de optimizar las decisiones de enrutamiento es utilizando los modelos matemáticos conocidos como diseños de rutas o problemas de enrutamiento. Estos problemas tienen diferentes variantes, debido a la limitación de vehículos, las capacidades de los mismos, los tiempos en los que se podrán atender a los clientes en conjunto con la combinación con otros factores.

Los elementos principales de este tipo de problema son:

- Los clientes.
- Los vehículos.
- El o los depósitos.

- Los servicios a atender (demandas y/o consumo).
- Las rutas solución.

## 2.1 PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

El problema de ruteo de vehículos (*vehicle routing problem*, *VRP*) es uno de los problemas más importantes en la Investigación de Operaciones y una extensión del *m-TSP* propuesto por primera vez por [11] donde se conforman las mejores rutas para una flota de camiones que deben transportar combustible entre las estaciones y los depósitos, con condiciones de capacidad para los vehículos y de demanda para los clientes (Figura 2.1). Con el transcurso del tiempo surgen nuevas problemáticas relacionadas directamente con la vida real, por lo que la adición de restricciones al modelo original provocan que existan diferentes modificaciones del problema [19].

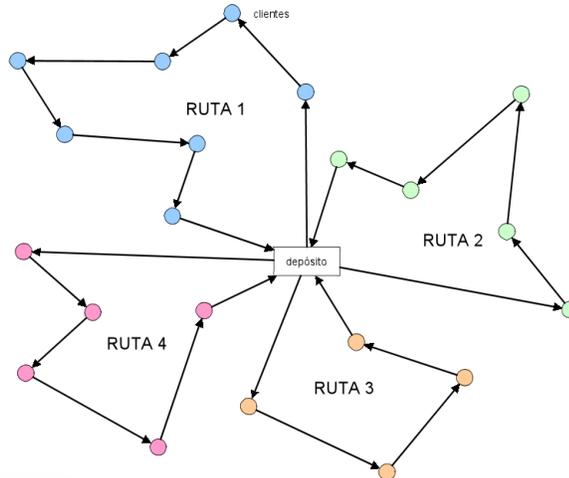


Figura 2.1: Representación clásica del VRP.

En general, el VRP consiste en diseñar las rutas óptimas para la distribución de productos a un grupo de clientes que se encuentran dispersos en una zona geográfica; se puede contar con uno o varios depósitos desde los cuales comienzan y terminan los

recorridos de los vehículos. La flota de vehículos puede ser homogénea o heterogénea dependiendo de la capacidad de cada uno o de otras características. Los clientes solo deben de ser visitados una sola vez para poder satisfacer la demanda, excepto en casos particulares donde se puede requerir lo contrario. El objetivo por lo general es minimizar los costos de transportación.

La variante de VRP queda determinada por los elementos que la componen, como las características de los vehículos, de los clientes, así como del objetivo que se quiera lograr. Estas características se describen a continuación:

Características de los vehículos:

- Capacidad del vehículo, puede estar dada en volumen o peso máximo que el vehículo pueda transportar.
- Costo asociado a la utilización del vehículo.
- El depósito donde se encuentran los vehículos puede ser único o existir varios de ellos.
- Red de transporte por la que el vehículo puede transitar.
- El vehículo puede llevar carga homogénea o puede ser heterogénea en algunos casos.

Características de los clientes:

- Ventanas de tiempo, es el intervalo de tiempo en el que el cliente puede ser atendido.
- Grupo de vehículos que pueden atender al cliente.
- Demanda que debe ser entregada al cliente.
- Un vértice en la red vial que representa su localización.

Los objetivos característicos que pueden ser considerados en este tipo de problemas son los siguientes:

- Minimizar el número de vehículos utilizados.
- Minimizar el tiempo o costo de transporte.
- Determinar el número de vehículos utilizados para satisfacer la necesidad de los clientes.

La combinación de cada uno de estos factores da como resultado un problema de ruteo de vehículos diferente.

Una extensión importante del *VRP* es el Problema de ruteo de vehículos con ventanas tiempo (*Vehicle routing problem with time windows, VRPTW*) [13]. En este problema se agrega la condición de ventanas de tiempos a las ya existentes de demanda y capacidad del cliente y del vehículo respectivamente [24]. El servicio de un cliente para este problema no debe de comenzar antes del período de inicio de la ventana de tiempo y el final del mismo. Tiene varias aplicaciones en la actualidad como entregas postales, enrutamiento, recolección de basura entre otros.

Otro Problema de optimización combinatoria que forma parte de esta gran familia, es el Problema de enrutamiento de vehículos capacitados (*CVRP, sus siglas en inglés*) planteado por primera vez por [8], introduciendo una restricción de capacidad y una flota homogénea; este tiene aplicación en la transportación, en la logística y en las telecomunicaciones [23].

El problema periódico de enrutamiento de vehículos (*PVRP, en sus siglas en inglés*), donde el horizonte de planificación se extiende a  $M$  días para satisfacer la demanda de los clientes, fue tratado en la literatura por primera vez por [7] para resolver un problema redes y enrutamiento de vehículos para la recogida de residuos municipales. Para este problema los clientes deben de ser servidos en cierto período de tiempo como se dijo anteriormente satisfaciendo siempre una demanda programada, por lo que se debe planificar los horarios de atención y las rutas a recorrer [3].

En [4] plantean el problema de tamaño de la flota, el cual posteriormente es mezclado con el VRP para ser conocido en la literatura *Fleet Size and Mix Problem* [14]. En este problema se desea determinar las mejores rutas y el número de vehículos necesarios para cubrir una demanda de clientes, donde la flota es considerada heterogénea.

## 2.2 PROBLEMA DE TAMAÑO DE LA FUERZA DE VENTAS

El problema de tamaño de la fuerza de ventas es una extensión del problema clásico de ruteo de vehículos *VRP* del cual existen múltiples variantes que se relacionan con el problema a resolver.

El problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea y ventanas de tiempo (*HVRPTW*) [22] posee restricciones que se relacionan con el *SFSP*. El objetivo de este es determinar la ruta óptima de vehículos heterogéneos para minimizar el costo total de operaciones, donde a su vez se tiene que cumplir con las restricciones de tiempo en los que pueden ser atendidos los clientes el cual debe de ser estrictamente en el tiempo establecido para realizar el servicio, además de tener en cuenta la capacidad y que un vehículo comienza y termina su ruta asignada en el mismo depósito.

Dadas las características del *SFSP* este se encuentra en la categoría de problemas de ruteo de vehículos ricos (*RVRP*), estos tipos de problemas presentan un grupo de restricciones o atributos que los caracterizan por tener en cuenta las particularidades del mundo real, que los modelos tradicionales no incluyen [12]. Los autores consideran una flota heterogénea fija, con ventanas de tiempo flexibles y múltiples, prioridades en los clientes y restricciones entre vehículos y clientes, queriendo decir esto último que algunos vehículos no pueden atender a algunos clientes. El problema presenta múltiples funciones objetivos donde la principal será minimizar la distancia total recorrida. Hay que destacar que existe una diferencia entre el problema encontrado en la literatura y el *SFSP* dado que en este último se desconoce

el tamaño de la flota teniendo que ser determinada.

En la búsqueda de literatura encontramos en [6] un algoritmo de búsqueda para resolver el problema del tamaño de la flota y el enrutamiento de vehículos mixtos con ventanas de tiempo y entregas divididas (FSMVRPTWSD). En este, la flota es heterogénea e ilimitada y la cual comienza y termina su recorrido en depósito. El algoritmo propuesto se modificó para poder realizar la experimentación con los problemas propuestos por Salomon(1987) y Liu y Shen(1999) donde obtuvo como resultado que el algoritmo mejora horizontes de planificación cortos, con clientes agrupados geográficamente y semi-agrupados y vehículos pequeños.

Una nueva variante del problema clásico de enrutamiento de vehículos se presenta en [27], donde mezclan el problema del Tamaño de la flota, el problema de Enrutamiento de vehículos mixtos y el Enrutamiento de vehículos con Backhauls denominado Tamaño de la flota y problema de enrutamiento de vehículos mixtos con redes de retorno (FSMVRPB); el objetivo es encontrar el costo mínimo de las rutas que se originan y terminan en el depósito. La heurística utilizada es basada en Set Partitioning Problem (SPP).

Este problema a tratar se caracteriza por los clientes estar divididos en dos grupos: clientes de entrega (linehaul) y recogida (backhaul), una flota heterogénea con diferentes costos fijos según el tamaño, las entregas se realizan primero a los clientes (linehaul) antes de atender algún cliente (backhaul), ninguna ruta puede contener solo a clientes (backhaul) pero si solo a clientes (linehaul).

En [18] presentan un algoritmo híbrido de búsqueda evolutiva (*HESA*) para resolver el problema del Tamaño de la Flota y la combinación de enrutamiento de ubicación con ventanas de tiempo (*FSMLRPTW*). El objetivo de resolver este problema es minimizar la suma de los costos fijos de vehículos, el costo de depósito y el costo de ruta. El algoritmo propuesto está basado en varias metaheurísticas de evolución; partiendo de un proceso de Inicialización para obtener soluciones iniciales, este se compone de dos etapas fundamentales: Educación y Mutación. En el procedimiento de Educación se realiza una búsqueda de vecindad adaptativa heterogénea

de ubicación grande ( $L - HALNL$ ) al que se le adiciona una etapa de Intensificación para obtener mejores resultados y el segundo procedimiento (Mutación) para diversificar las soluciones. Como conclusiones los autores obtienen resultados superiores para el problema al ir incorporando cada procedimiento a la solución del problema.

Un problema diferente de enrutamiento de vehículos se ha presentado por [16], denominado Problema de enrutamiento de vehículos eléctricos de tamaño de flota y mezcla con ventanas de tiempos y estaciones de recarga (E-FSMFTW). Para resolverlo, los autores desarrollaron una Búsqueda adaptativa de vecindarios grandes (ALNS), este se combina con un procedimiento de búsqueda local para la intensificación, así como un procedimiento de etiquetado para optimizar la posición de las estaciones de recarga de los vehículos.

## CAPÍTULO 3

# DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

---

En este capítulo se realizará una descripción de las características del problema de tamaño de la fuerza de ventas (SFSP), así como su modelo matemático. El modelo que se plantea fue propuesto por [26].

### 3.0.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema de tamaño de la fuerza de ventas "*The sales force sizing problem*" (SFSP), es una versión extendida del problema clásico de ruteo de vehículos VRP. El SFSP tiene como objetivo minimizar el salario nominal total a partir de la definición del tamaño de la fuerza de ventas necesaria para satisfacer las demandas de los clientes en un horizonte de planificación; para esto se construyen las posibles rutas de cada vehículo teniendo en cuenta que siempre se comienza en un depósito y se regresa a este después de visitar al último cliente. Todos los clientes deben de ser atendidos

Cada ruta como se mencionó anteriormente comienza en un depósito y se incorporarán clientes para conformarla mientras la demanda de estos puede ser satisfecha por la capacidad del vehículo. Cada cliente tiene una categoría que hace que solo pueda ser atendido por un vehículo con mayor o igual clase que el cliente, por lo que se puede decir que la flota es heterogénea. El salario de un vehículo depende de la categoría de este.

Los clientes se encuentran dispersos geográficamente y cada uno presenta una

ventana de tiempo para recibir el servicio, si se llega a los clientes antes de comenzar la ventana de tiempo se deberá esperar a que comience esta para poder ser atendido, mientras que si se llega después del tiempo límite no se podrá ser atendido. Cada cliente es servido únicamente por un solo vehículo en un horizonte de planificación de una semana, de lunes a sábado con una jornada laboral de 8 horas.

### 3.0.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Sea  $G = (V, A)$  un grafo completo,  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  es el conjunto de  $n + 1$  vértices donde  $n$  representa la cantidad de clientes y  $A$  el conjunto de arcos. 0 y  $n + 1$  representan el depósito.

- $|P|$ : número de días de trabajo.
- $p$ : Día en que se realiza la visita.
- $W$ : Categorías del cliente.
- $S_w$ : Salario asociado a la categoría  $w$  y  $V_w \subset V$  para los clientes de igual categoría  $w \in W$  tal que  $V = \cup_{w \in W} V_w$ .
- $|K|$ : Número máximo de vehículos.
- $q_k$ : Salario del vendedor  $k \in K$ .
- $t_i$ : Hora de inicio del servicio en el nodo  $i \in V$ .
- $b_i$ : Tiempo de servicio del cliente  $i \in V$ .
- $T$ : Duración máxima de un día de trabajo.

**Ventanas de tiempo:**

Para cada  $i \in V$

- $e_i^p$  : Hora más temprana en la que puede comenzar el servicio el día  $p$  con el cliente  $i$ .
- $f_i^p$  : Hora límite en la que se puede comoenzar el servicio el día  $p$  con el cliente  $i$ .
- Para cada  $p \in P$  tendremos que  $[e_i^p; f_i^p]$  será una ventana de tiempo.
- Cuando un cliente no acepta ser visitado un día  $p$  entonces  $e_i^p = f_i^p = 0$ .

**Variables de decisión:**

$$x_{ijk}^p = \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } j \text{ es atendido después del cliente } i \text{ por el vendedor } k \in K \text{ en el día } p \in P \\ 0 & \text{otra situación.} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$y_k^w = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } k \in K \text{ atiende al cliente con categoría } w \in W. \\ 0 & \text{otra situación} \end{cases} \quad (3.2)$$

**Función Objetivo:**

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{k \in K} q_w \quad (3.3)$$

*sujeto a:*

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0jk}^p = 1 \quad k \in K, p \in P \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{j(n+1)k}^p = 1 \quad k \in K, p \in P \quad (3.5)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ijk}^p = \sum_{(j,i) \in A} x_{jik}^p \quad k \in K, p \in P, j \in V \setminus \{n+1\} \quad (3.6)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in V} x_{ijk}^p \leq y_k^w \quad w \in W, j \in V_w, k \in K \quad (3.7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{i \in V} x_{ijk}^p = 1 \quad j \in V \quad (3.8)$$

$$q_k \geq S_w y_k^w \quad w \in W, k \in K \quad (3.9)$$

$$t_i + b_i + t_{ij} - t_j \leq T(1 - \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} x_{ijk}^p) \quad (i, j) \in A \quad (3.10)$$

$$t_j \geq \sum_{p \in P} e_j^p \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} x_{ijk}^p \quad j \in V \setminus \{0\} \quad (3.11)$$

$$t_j \leq \sum_{p \in P} f_j^p \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} x_{ijk}^p \quad j \in V \setminus \{0\} \quad (3.12)$$

$$t_0 = 0 \quad (3.13)$$

$$t_i \geq 0 \quad i \in V, k \in K \quad (3.14)$$

$$x_{ijk}^p \in \{0, 1\} \quad k \in K, p \in P, (i, j) \in A \quad (3.15)$$

$$y_k^w \in \{0, 1\} \quad k \in K, w \in W \quad (3.16)$$

- La restricción (3.3) es la función objetivo y representa la suma de los salarios nominales de todos los vendedores.
- Para garantizar que los vehículos partan y regresen al final al depósito del recorrido se encuentran las restricciones (3.4) y (3.5).
- Las restricciones (3.6) son utilizadas para la conservación de flujo de cada cliente que es visitado, es decir si un vehículo llega a visitar un cliente este tiene que partir de este a visitar otro.
- Con las restricciones (3.7) y (3.8) podemos identificar las categorías de los clientes atendidos por cada vehículo y asegurar que cada cliente sea atendido por un solo vehículo .
- Las restricciones (3.9) establecen que el salario nominal del vendedor  $k \in K$  corresponde a la categoría más cara de los clientes a los que sirve.
- Las restricciones (3.10) asegura que el tiempo de trabajo no exceda la duración máxima de un día laboral  $T$ .
- Con (3.11) y (3.12) garantizan el cumplimiento de que cada cliente sea atendido dentro dentro del tiempo establecido en su ventana de tiempo.
- La restricción (3.13) marca la hora de comienzo del servicio desde el depósito de salida.

## CAPÍTULO 4

# DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

---

En este capítulo se tiene como objetivo el planteamiento de la metodología para dar solución al problema objeto de estudio. Para obtener la solución inicial se utilizó un algoritmo multi-arranque propuesto por [26] el cuál está compuesto por dos fases. La solución obtenida como respuesta será tomada como nuestra solución inicial para la realización de una exploración más profunda en el espacio de búsqueda a través de un ALNS (Adaptative Large Neighborhood Search) (Figura 4.1) con la finalidad de mejorar los resultados encontrados en la literatura.

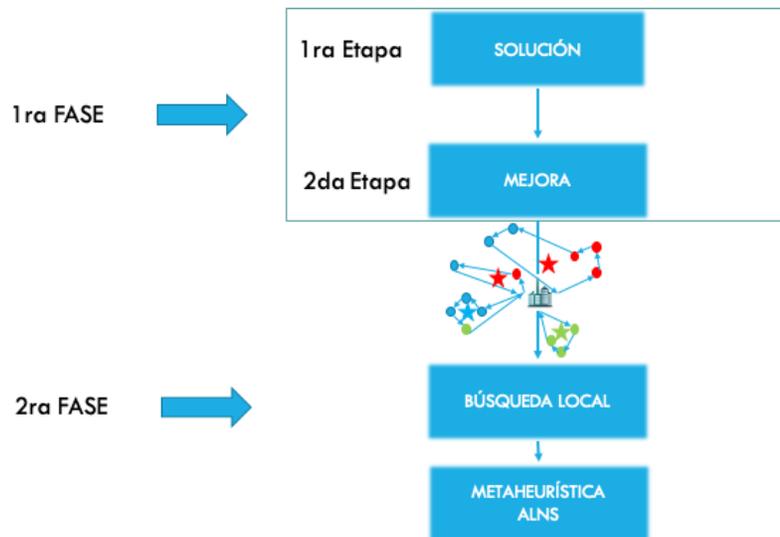


Figura 4.1: Algoritmo Propuesto

### 4.0.1 CONSTRUCCIÓN DE UNA SOLUCIÓN INICIAL

En los métodos multi-arranque se alternan una fase de generación de soluciones con otra de mejora de las mismas; este proceso se repite hasta que se cumple un criterio de parada, de esta forma se logra combinar adecuadamente el poder de exploración de los métodos de construcción con el poder de explotación de los métodos de mejora [20]. Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1** Método Multi-Arranque

---

```
1: while Criterio de parada do  
2:   Fase 1: Solución inicial.  
3:   Construir solución inicial  $x_0$   
4:   Fase 2: Búsqueda  
5:   Aplicar método de búsqueda.  
6:   Sea  $x_1$  la solución obtenida.  
7:   if  $x_1$  es mejor que  $x_0$  then  
8:      $x_0 = x_1$   
9:     Actualizar solución.  
10:  end if  
11: end while
```

---

**FASE 1: SOLUCIÓN INICIAL.**

La solución inicial está conformada por dos etapas; en la primera etapa se crean las rutas que atenderán a los clientes; para construir la primera ruta se toma un cliente al azar dando prioridad de selección a los de mayor categoría, luego se pasa a escoger el otro cliente a ser insertado en la ruta tomando en cuenta el mismo criterio anterior, este procedimiento se repetirá hasta que se incumpla una ventana de tiempo o la capacidad del vehículo. Cuando pase lo anterior se pasa entonces a la creación de una nueva ruta teniendo como candidatos los clientes que no han sido visitados. Figura 4.2

En la etapa de mejora se toma la solución encontrada y se realiza una agitación para evitar los óptimos locales, esta consiste en seleccionar un vehículo mediante el procedimiento de una ruleta basado en los salarios de estos los cuales serán directamente proporcionales a la probabilidad de selección, y luego de seleccionado se elimina la ruta que es atendida por este. Los clientes que queden sin ser asignados a una ruta son insertados en otras rutas al azar de otros vehículos Figura 4.3 , si no existiera alguna inserción factible entonces se contrata un nuevo vehículo. La solución obtenida en esta etapa del algoritmo sería la que tomaríamos como solución inicial.

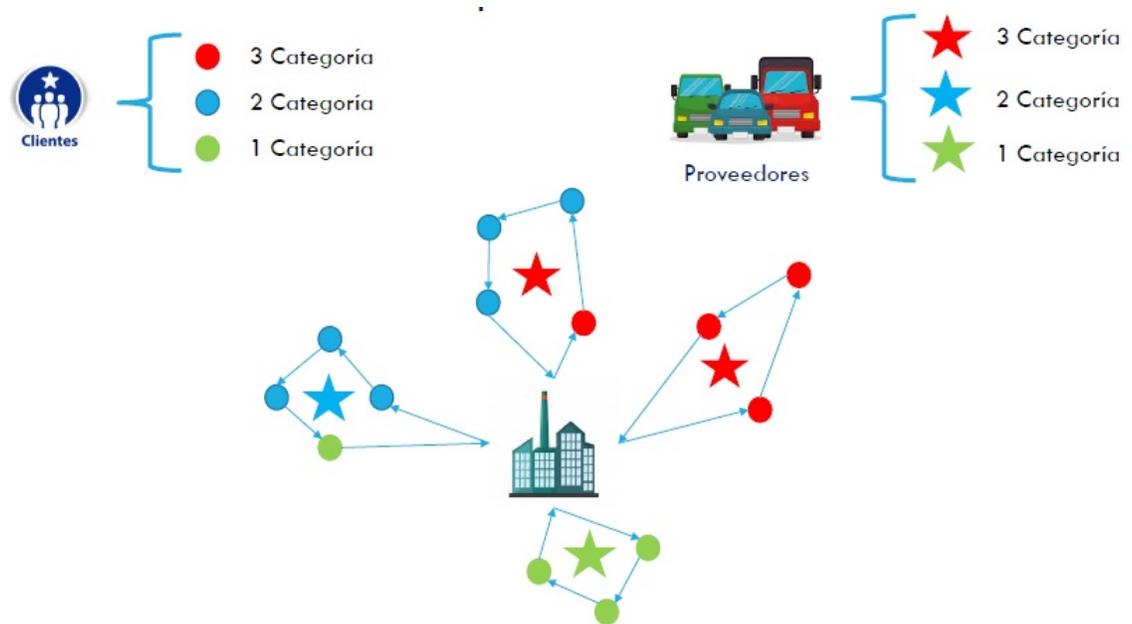


Figura 4.2: Construcción de las rutas iniciales

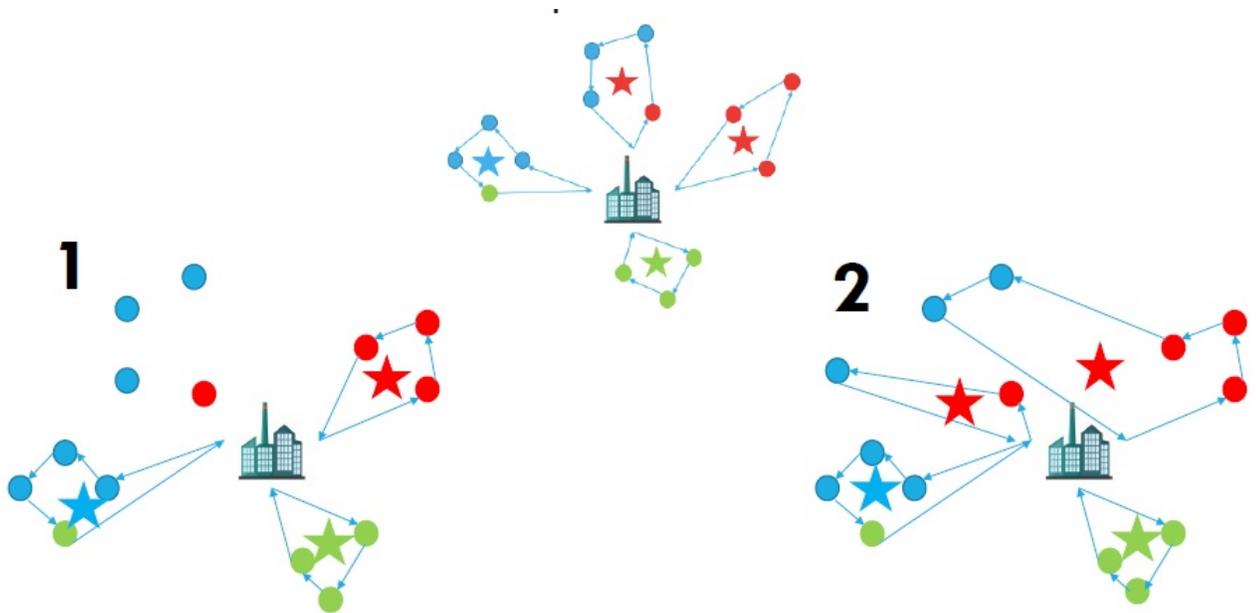


Figura 4.3: Algoritmo de Mejora.

## FASE 2: BÚSQUEDA

La búsqueda local consiste en ir eliminando vehículo por vehículo para tratar de mejorar la solución inicial, es decir minimizar costo de salario nominal, los clientes no visitados son insertados al azar en otras rutas probando todas las posibles inserciones. Este procedimiento es aplicado hasta que se encuentran 100 soluciones de no mejora consecutivas.

### 4.0.2 CONSTRUCCIÓN DE LA METAHEURÍSTICA

La Búsqueda Adaptativa de Vecindarios Grandes (ALNS) es una extensión de la Búsqueda de Vecindarios Grandes propuesta por [25], que permite realizar cambios más drásticos en la solución al explorar un espacio de búsqueda aún mayor. Las heurísticas de destrucción y reparación que la componen se adaptan a las instancias del problema, las cuales nos podría brindar con éxito o no una solución, por lo que

sería complejo identificar cual heurística utilizada será la mejor; para esto el ALNS no limita la cantidad de heurísticas a utilizar.

ALNS controla dinámicamente la probabilidad de seleccionar una heurística de acuerdo con su historial de rendimiento en el proceso de búsqueda durante el tiempo de ejecución del algoritmo [2], por lo que la selección del operador de destrucción o reparación se basa en estas probabilidades. Lo explicado anteriormente se puede ver en Algoritmo 2.

Este le asignará pesos a las heurísticas según los resultados satisfactorios que se irán actualizando periódicamente durante el tiempo de ejecución del algoritmo, por lo que la selección del operador de destrucción o reparación se basa en estos pesos.

Partiendo de la solución inicial este procedimiento es aplicado iterativamente para mejorar la calidad de la misma. Los operadores de destrucción eliminan de forma iterativa  $n$  clientes de la solución y los coloca en una lista de eliminación  $T_r$  de igual tamaño. Al remover un cliente se comprueba si la ruta puede ser atendida por un vehículo de menor categoría y se actualiza la solución. Cuando se realiza la inserción se comprueba nuevamente el tipo de vehículo a utilizar, así como las condiciones de ventanas de tiempo y capacidad.

#### OPERADORES DE DESTRUCCIÓN

1. **Operador de eliminación:** Se selecciona un cliente aleatorio teniendo más probabilidad los de mayor categoría y se elimina de la solución.
2. **Eliminación de la peor distancia:** Se elimina un número de clientes de mas alta categoría, con mayor costo relacionado con la distancia. El costo de un cliente es la distancia de su predecesor  $i$  y la distancia de sucesor  $k$ . Este operador elimina los clientes  $j^*$  iterativamente donde:
  - $d_{ij}$ : distancia de  $i$  a  $j$ .
  - $d_{jk}$ : distancia de  $j$  a  $k$ .

---

**Algoritmo 2** ALNS

---

**Require:** Solución inicial  $S_0$ .

Conjunto de destrucción  $D$ .

Conjunto de reparadores  $I$ .

Probabilidad de selección de cada operador  $P$ .

**Initialization**

Inicializar la probabilidad  $P$  de selección para cada operador de destrucción  $d \in D$ .

Inicializar la probabilidad  $P$  de selección para cada operador de inserción  $i \in I$ .

Solución inicial.

- 1: **while** Criterio de parada **do**
  - 2:   Seleccionar un operador  $d \in D$  con probabilidad  $P$ .
  - 3:    $S_0 \rightarrow S^*$ : Luego aplicar el operador de destrucción  $d$ .
  - 4:   Comprobar si se puede contratar un vehículo de menor categoría para cada ruta.
  - 5:   Seleccionar un operador de inserción  $i \in I$  con probabilidad  $P$ .
  - 6:    $S^* \rightarrow S$ : Luego aplicar el operador de inserción  $i$ .
  - 7:   **if**  $S > S_0$  **then**
  - 8:      $S_0 \rightarrow S$
  - 9:   **end if**
  - 10:   Actualizar probabilidad  $P$  para cada  $d \in D$  y  $i \in I$  cada  $n$  iteraciones.
  - 11: **end while**
-

$$j^* = \operatorname{argmax}_{j \in N \setminus \{0\} T_r} \{d_{ij} + d_{jk}\} \quad (4.1)$$

3. **Eliminación del peor tiempo:** Para cada cliente los costos se calculan dependiendo de la desviación entre la hora de llegada y el comienzo de la ventana de tiempo. Este operador elimina iterativamente clientes con la mayor desviación.

- $z_j$  : tiempo de arribo.
- $a_j$ : tiempo de comienzo de la ventana de tiempo.
- $g_i^h$ : costo fijo asociado con el vehículo que sirve a  $i$ .
- $g_1^{h^*}(i)$ : costo fijo asociado después de remover el cliente  $i$ .

$$j^* = \operatorname{argmax}_{j \in N \setminus \{0\} T_r} \{(z_j + a_j) + (g_i^h - g_1^{h^*}(i))\} \quad (4.2)$$

4. **Eliminación de vecindad:** En una solución con  $\mathfrak{R}$  conjuntos de rutas, se calcula una distancia media para cada ruta  $R \in \mathfrak{R}$

$$\bar{d}(R) = \sum_{(i,j) \in R} d_{ij} / |R| \quad (4.3)$$

y se selecciona un

$$j^* = \operatorname{argmax}_{R \in \mathfrak{R}; j \in R} \{\bar{d} - d_{R \setminus \{j\}} + f_i^h - f_1^{h^*}(i)\} \quad (4.4)$$

donde  $d_{R \setminus \{j\}}$  es la distancia de la ruta  $R$  excluyendo el nodo  $j$ .

- $f_i^h$ : costo fijo asociado con el vehículo que sirve a  $i$ .
- $f_1^{h^*}(i)$ : costo fijo asociado después de remover el cliente  $i$ .

5. **Costo promedio por costo de remoción:** Este mide la eficiencia de un vehículo  $\Pi(R)$  en la ruta  $R$ .  $\Pi(R)$  es el ratio que se expresa como la relación

entre el costo total de viaje y el costo fijo del vehículo sobre la demanda total transportada por un vehículo  $k$  que atraviesa la ruta  $R$ .

$$\Pi(R) = \frac{\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k + e^k}{\sum_{i \in N \setminus \{0\}} q_i x_{ij}^k} \quad (4.5)$$

- $\sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}^k$ : costo total de un viaje para la ruta  $R$ .
- $e^k$ : costo fijo del vehículo utilizado en la ruta  $R$ .
- $\sum_{i \in N \setminus \{0\}} q_i x_{ij}^k$ : demanda transportada por el vehículo.

El objetivo del operador es calcular el costo de cada ruta y eliminar la solución con el menor valor  $\Pi(R)$ , dando prioridad a las rutas con vehículos de mayor categoría..

#### OPERADORES DE REPARACIÓN

1. **Inserción codiciosa:** Encuentra la mejor posición de inserción posible para todos los nodos en  $T_r$  mientras el cálculo del costo se basa en la distancia. El proceso se realiza para cada elemento de la lista  $T_r$ .

$$\Upsilon(i, j) = d_{ij} + d_{jk} - d_{ik} \quad (4.6)$$

$$i^* = \operatorname{argmin}_{i \in N \setminus T_r} \{\Upsilon(i, j)\} \quad (4.7)$$

2. **Inserción codiciosa con operador de función de ruido:** Es una variante del reparador anterior solo que se le agrega un grado de libertad al seleccionar la mejor posición de inserción posible para un nodo.

$$\text{costoderuido} = \Upsilon(i, j) + d_{max} p_n \quad (4.8)$$

$d_{max}$ : máxima distancia entre todos los nodos.

$p_n$ : parámetro usado para la diversificación con valor (0.1).

$\Upsilon$  : número aleatorio entre  $[-1, 1]$ .

## PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE PESO

Cada operador de destrucción y de reparación tiene cierta probabilidad de ser elegido, teniendo en cuenta que la selección en un grupo es totalmente independiente de la selección en el otro. Para la realización de este procedimiento, se le asignan pesos a cada una de los operadores que inicialmente será el mismo para cada uno, en este procedimiento el peso utilizado es 2.

Para el conjunto de operadores  $t$ , cada uno tendrá un peso  $w_i, i = \{1, 2, \dots, t\}$ ; la probabilidad de selección del operador de destrucción  $i$  será:

$$\frac{w_i}{\sum_{i=1}^D w_i} \quad (4.9)$$

Los pesos  $w_j$  son ajustados automáticamente utilizando las estadísticas de las iteraciones anteriores. Para esto se realiza un registro de una puntuación para cada operador, que mide cuán bien se ha desempeñado recientemente. Una puntuación alta corresponde a un operador exitoso. Toda la búsqueda se divide en un número de segmentos. Un segmento es un número de iteraciones de la heurística del ALNS; en este caso quedó definido por 100 iteraciones (Figura 4.4).

1	2	3	4	
2	2	2	2	Iteración 1
4	0	0	0	Iteración 2
0	0	1	0	Iteración 3
0	0	0	0	Iteración 4
0	0	0	1	Iteración 5
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
0	0	4	0	Iteración 99
<b>Actualizar Probabilidad</b>				
6	2	7	3	<b>Iteración 100</b>

Figura 4.4: Ajuste de Pesos

La puntuación de todos los operadores se establece al comienzo de cada segmento, la misma se incrementa en  $\sigma_1 = 4, \sigma_2 = 1$  o  $\sigma_3 = 0$  en las siguientes situaciones:

$\sigma_1$  : La última operación de destrucción y reparación resultó en una nueva solución global mejor.

$\sigma_2$  : La última operación de destrucción y reparación dio como resultado una solución que ha sido aceptada antes.

$\sigma_3$  : La última operación de destrucción y reparación dio como resultado una solución que no ha sido aceptada antes. El coste de la nueva solución es peor que el de la actual.

En el caso de  $\sigma_1$  si un operador nos da como resultado una nueva solución

global mejor, entonces se considera que su desempeño es el correcto, de otra forma si un operador encuentra una solución que no ha sido visitada antes y es aceptada por el criterio de aceptación en la búsqueda del ALNS operador ha tenido éxito ya que ha llevado la búsqueda a una mejor solución.

En cada iteración aplicamos dos operadores: un operador de destrucción y un operador de reparación. Las puntuaciones de ambos operadores se actualizan en la misma cantidad ya que no podemos decir si fue la extracción o la inserción la razón del "éxito". Al final de cada segmento calculamos nuevos pesos utilizando las puntuaciones registradas

## CAPÍTULO 5

# EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

---

Con la finalidad de evaluar el desempeño de la metodología de solución planteada para este trabajo se realizaron un grupo de experimentos computacionales los cuales se describirán en este capítulo.

En el experimento 1 se realiza una comparación con los resultados obtenidos del método multi-arranque con los resultados obtenidos por [26] en CPLEX.

En el experimento 2 se realiza una comparación de los resultados obtenidos con el algoritmo multi-arranque y el ALNS propuesto en este trabajo.

En el experimento 3 realizado se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por la metodología propuesta en este trabajo y las soluciones alcanzadas en metodología propuesta por [26].

### ENTORNO EXPERIMENTAL

El algoritmo propuesto fue implementado en Python (Versión 3.8) en una computadora con las siguientes características:

<b>Procesador</b>	1.8 GHz Intel Core i5, 2 núcleos
<b>Memoria</b>	8 Gb 1600MHz DDR3
<b>Disco Duro</b>	120 Gb SSD
<b>Sistema Operativo</b>	macOS Catalina Versión 10.15.4

Tabla 5.1: Características de la PC.

## DESCRIPCIÓN DE LAS INSTANCIAS

La experimentación se implementó con 4 grupos de instancias, cada uno con 50 casos a resolver para un total de 200 disponibles, las que fueron propuestas por [26] para comprobar la eficiencia del algoritmo que se diseñó. Las instancias varían de acuerdo a la cantidad de clientes, la categoría de los vehículos, características de las ventanas de tiempo y la duración del servicio asignado a cada cliente. Para todas el número de días para realizar la planificación será de 3 y la jornada laboral de 8 horas.

Se dispone de 4 grupos de instancias como se mencionó anteriormente, debido al número de clientes: instancias con 10, 12, 14, 16 clientes de prueba; para cada tamaño hay 50 instancias que se dividen en 5 basadas en las categorías de los vehículos. Estas seis categorías son nombradas como 1, 2, 3, 4 y 5.

Los costos asociados a las categorías de los vehículos se muestran en la Tabla 5.3 a continuación:

<b>Categoría</b>	<b>Costo</b>
<b>1</b>	100
<b>2</b>	200
<b>3</b>	300
<b>4</b>	400
<b>5</b>	500

Tabla 5.2: Costos Asociados

## EXPERIMENTO 1: COMPARACIÓN ENTRE MÉTODO MULTI-ARRANQUE Y CPLEX.

En las Figuras 5.1-5.4 se muestra una comparación entre el Constructivo y CPLEX con respecto a los valores de las funciones objetivos encontradas por estos, como se puede ver CPLEX mantiene un mejor desempeño que el Constructivo,

aunque para el grupo de instancias (*Instancia10* – *Instancia12* – *Instancia14*) el Constructivo se acerca más a los valores encontrado por el mismo, mientras que para las instancias más grandes (*Instancia16*) los valores están más alejados.

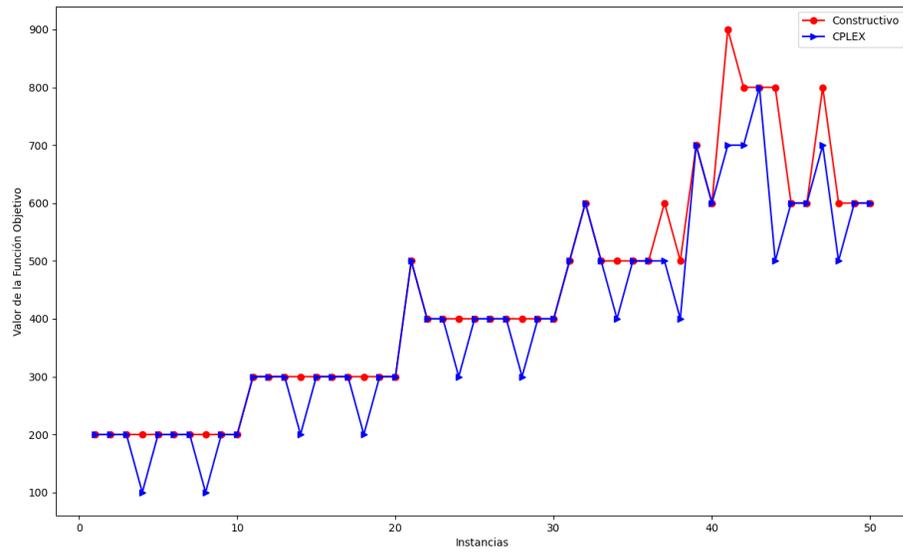


Figura 5.1: Instancias10.

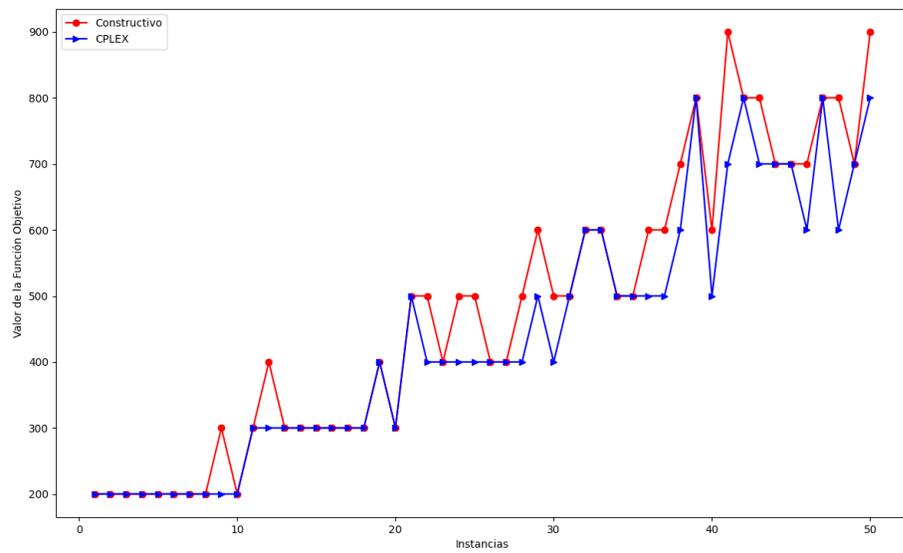


Figura 5.2: Instancias12.

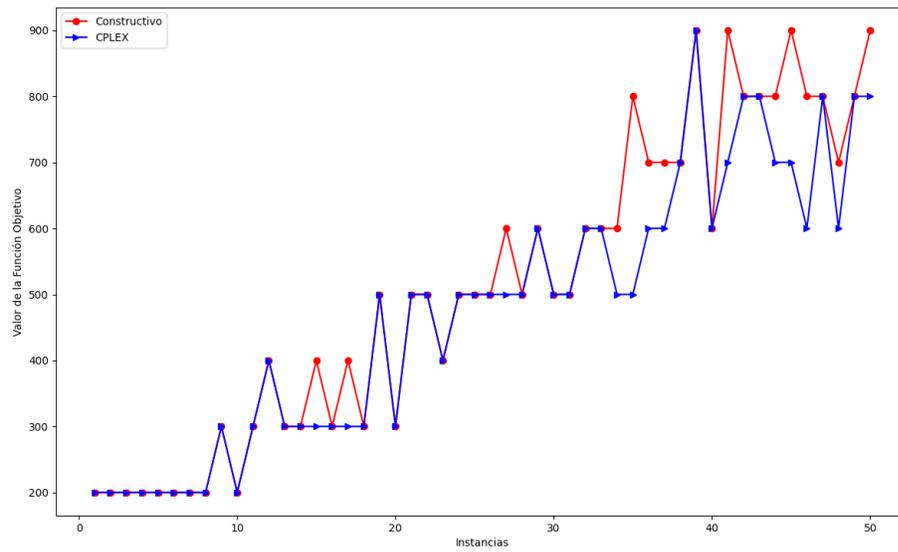


Figura 5.3: Instancias14.

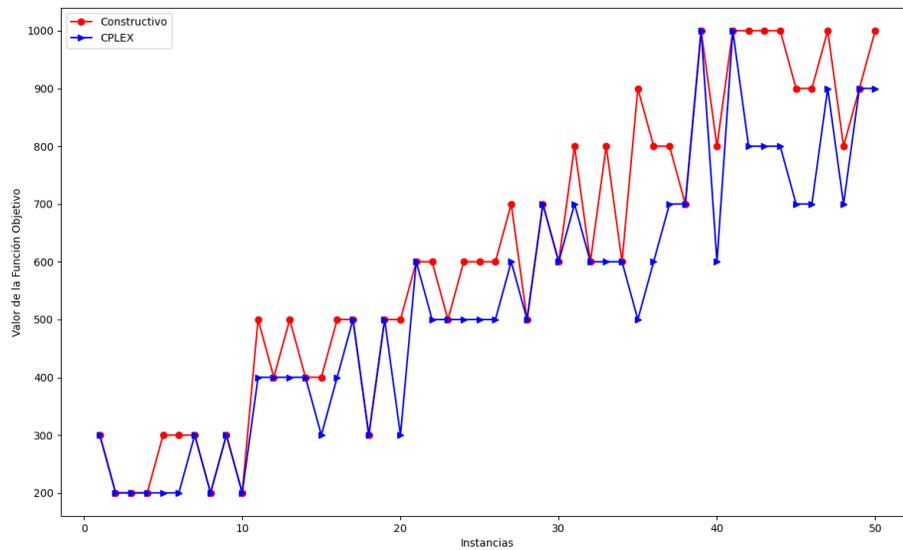


Figura 5.4: Instancias16.

La Tabla 5.3 muestra el número de instancias en las que el método Constructivo pudo alcanzar los valores óptimos arrojados por CPLEX. Como se puede ver el

grupo de instancias que mayor número de óptimos alcanzó fue *Instancias14* lo que representa un 74 % seguido del grupo *Instancias10* con un 72 % y *Instancias16* con 55 %; el peor resultado se obtuvo para las *Instancias12* ya que solo llegó al óptimo en el 48 % de las soluciones.

	Class10c3d	Class12c3d	Class14c3d	Class16c3d	TOTAL
CPLEX	50/50	50/50	47/50	20/50	167/200
Constructivo	36/50	24/50	35/47	11/20	106/167

Tabla 5.3: Número de veces en las que el método reportó mejores valores de la función objetivo.

En Tabla 5.4 se reportan , los tiempos totales de ejecución, en segundos, requeridos por CPLEX y por el Constructivo para llegar a las soluciones de cada uno de los grupos de instancias.

Clases	Tiempos(s)	
	CPLEX	Constructivo
<b>Class10c3d</b>	103.03	2.32
<b>Class12c3d</b>	2660.98	2.19
<b>Class14c3d</b>	36758.42	2.78
<b>Class16c3d</b>	131920.7	3.30
<b>TOTAL</b>	171443.13	10.59

Tabla 5.4: Tiempos de ejecución totales, en segundos, requeridos por el optimizador CPLEX y por el Constructivo.

## EXPERIMENTO 2: COMPARACIÓN ENTRE MÉTODO MULTI-ARRANQUE Y ALNS.

Se realizó un análisis entre los valores de la función objetivo del Constructivo y el método ALNS a partir de las Figuras 5.5 - 5.8. En la implementación del ALNS

como se puede ver se mejora el desempeño del método anterior implementado aunque no es significativa la mejora para el grupo de instancias, donde se alcanzó mayor número de mejora es en el grupo *Instancias16* como se puede apreciar.

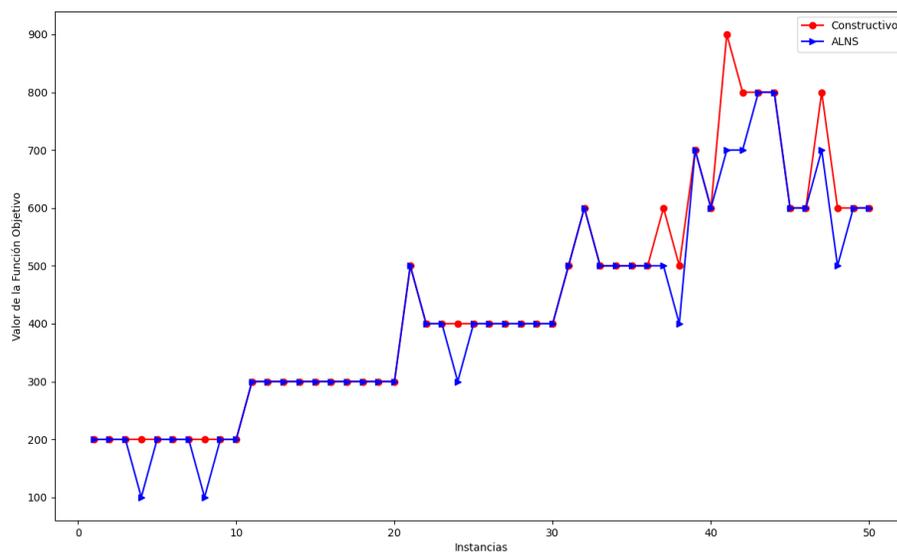


Figura 5.5: Instancias10.

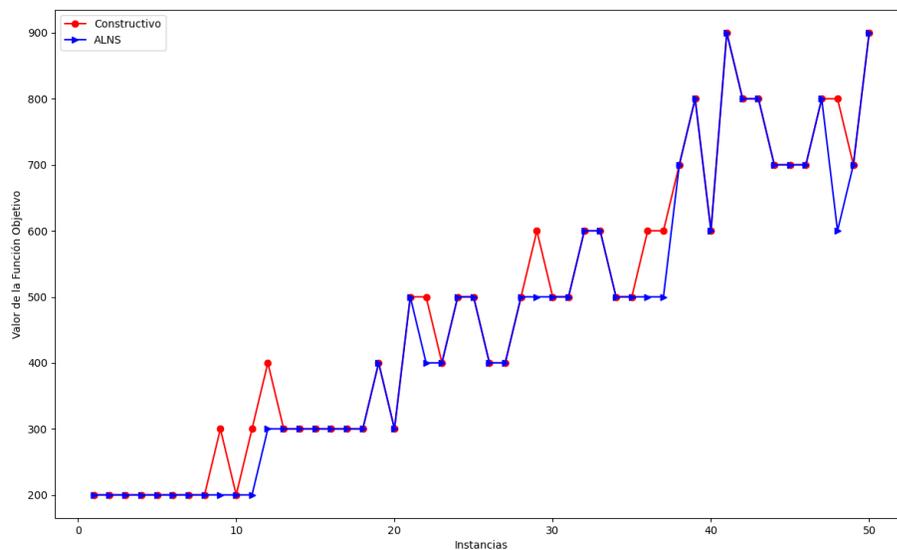


Figura 5.6: Instancias12.

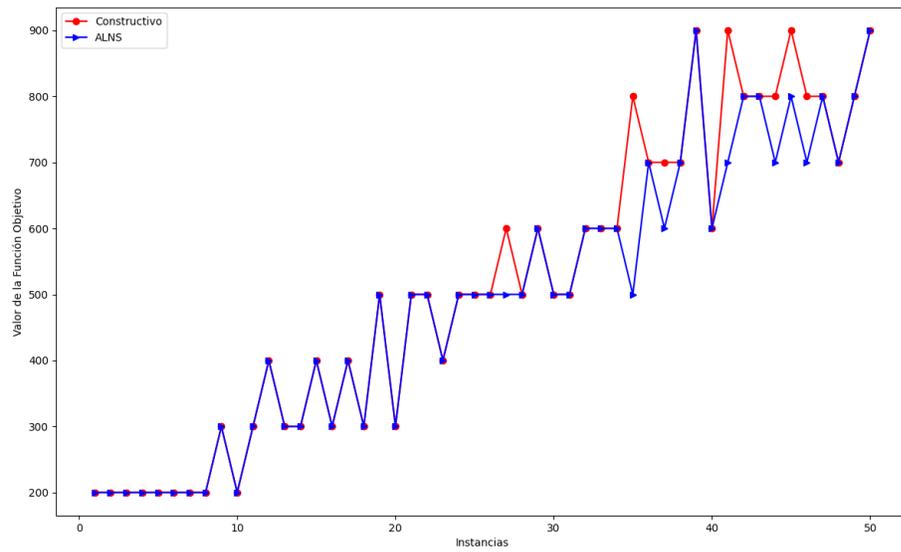


Figura 5.7: Instancias14.

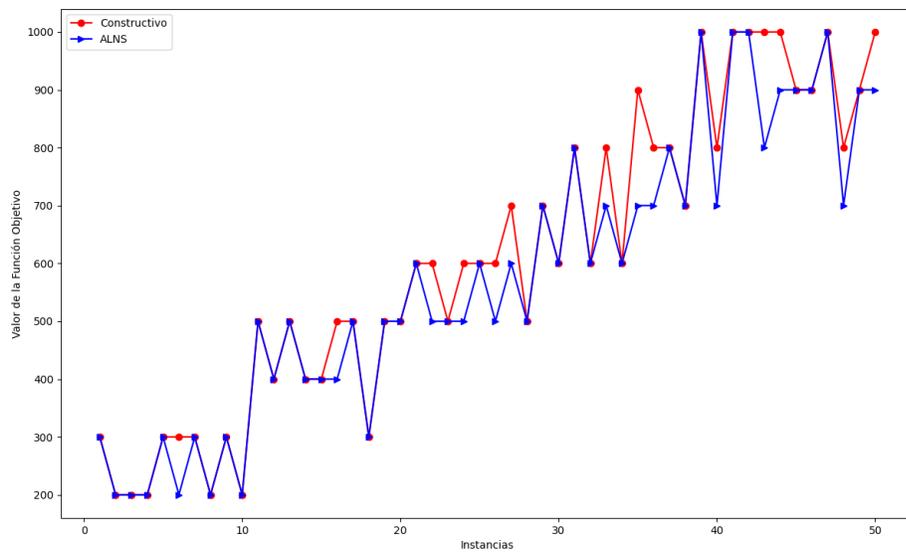


Figura 5.8: Instancias16.

En la Table 5.5 se puede observar el número de instancias que se obtuvieron con mejor valor de la función objetivo al aplicar el método ALNS con respecto al

Constructivo, en el caso del grupo *Instancias12* fue donde se encontraron el mayor número de mejoras al superar la cantidad de óptimos alcanzados por el Constructivo en 16 instancias, mientras que para las instancias del grupo *Instancias14* solo se logró una mejora en dos instancias con respecto al Constructivo. Con la aplicación de la metaheurística ALNS se logró encontrar 31 soluciones óptimas más que lo reportado en la solución inicial.

	<b>Class10c3d</b>	<b>Class12c3d</b>	<b>Class14c3d</b>	<b>Class16c3d</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Constructivo</b>	36/50	24/50	35/47	11/20	106/167
<b>ALNS</b>	44/50	40/50	37/47	16/20	137/167

Tabla 5.5: Número de veces en las que el ALNS reportó mejores valores que el Constructivo.

En Tabla 5.6 se reportan, los tiempos totales de ejecución, en segundos, requeridos por el Constructivo y el ALNS para llegar a las soluciones de cada uno de los grupos de instancias.

	<b>Tiempos(s)</b>	
Clases	<b>Constructivo</b>	<b>ALNS</b>
<b>Class10c3d</b>	2.32	2.52
<b>Class12c3d</b>	2.19	2.78
<b>Class14c3d</b>	2.78	3.22
<b>Class16c3d</b>	3.30	3.51
<b>TOTAL</b>	10.59	12.03

Tabla 5.6: Tiempos de ejecución totales, en segundos, requeridos por el optimizador CPLEX y por el Constructivo.

## EXPERIMENTO 3: COMPARACIÓN ENTRE ALNS Y CPLEX.

Se realizó un análisis entre los valores de la función objetivo del ALNS y CPLEX a partir de las Figuras 5.9-5.12. Con los resultados obtenidos del ALNS se puede decir que para el grupo *Instancias10* es donde se logra mejor desempeño para alcanzar los valores de CPLEX, mientras el grupo *Instancias16* queda en último lugar dado que es donde se encuentran más valores de la función objetivo que no alcanzan los valores de CPLEX.

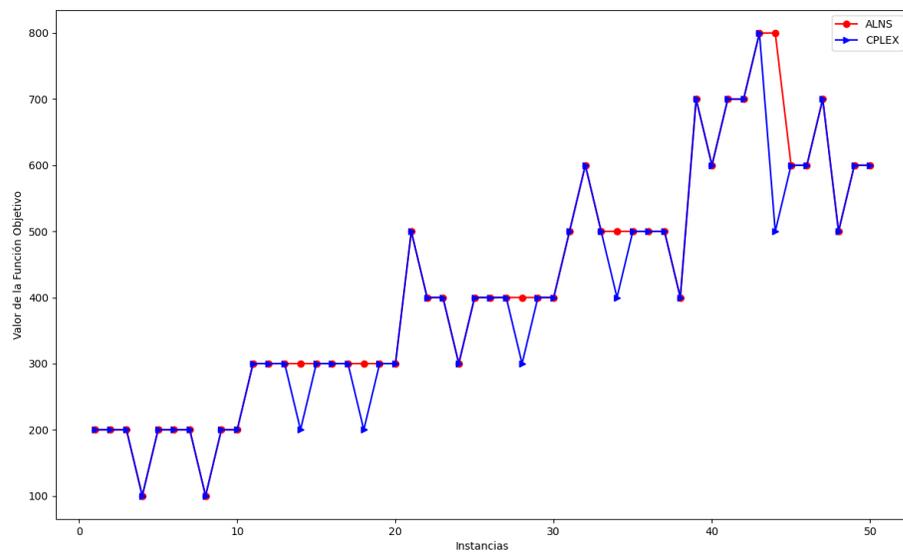


Figura 5.9: Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias10.

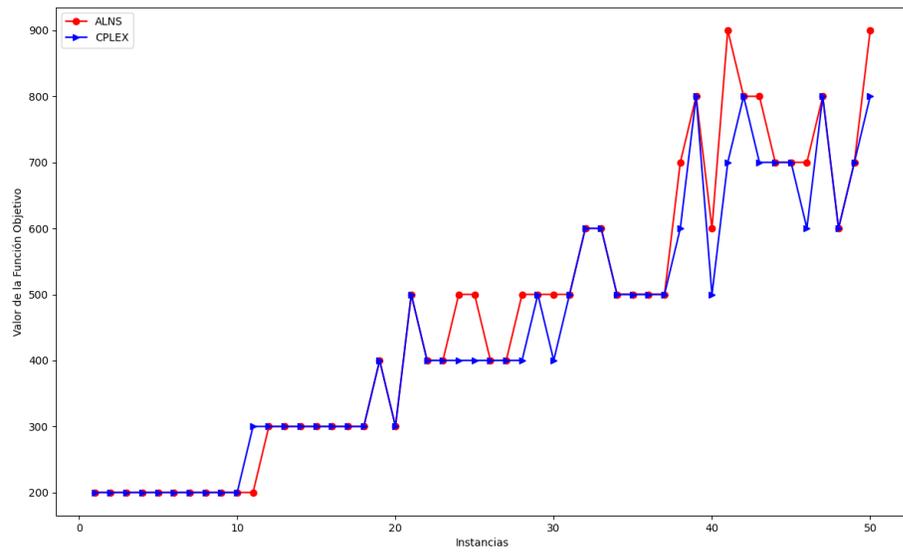


Figura 5.10: Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias12.

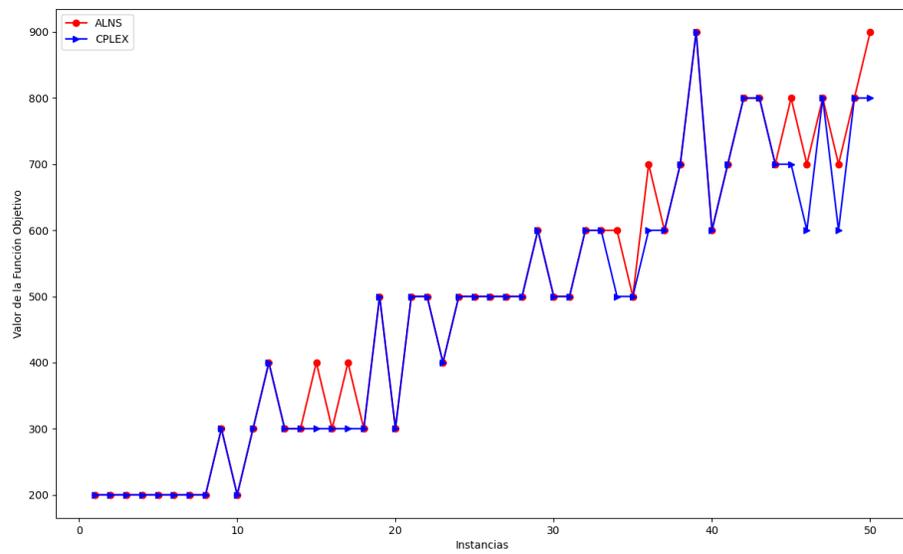


Figura 5.11: Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias14.

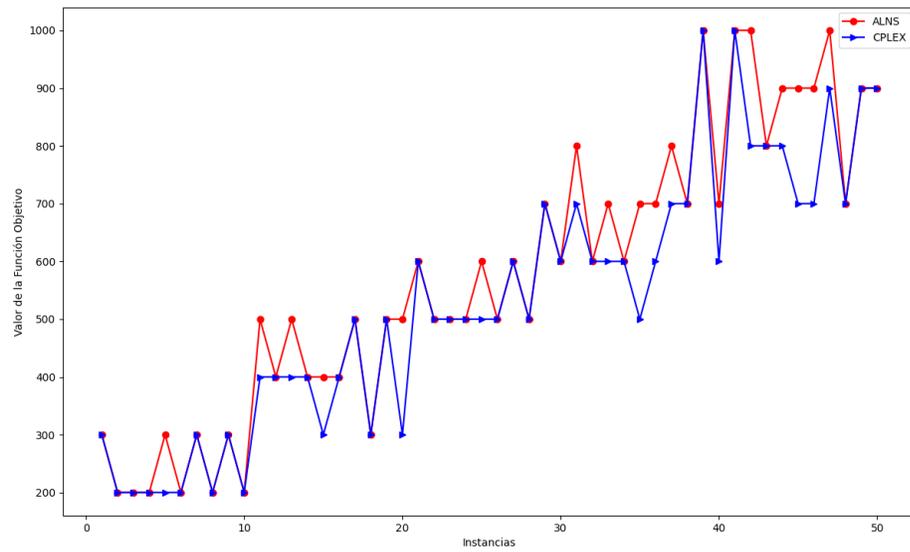


Figura 5.12: Costo de las soluciones encontradas en el conjunto de Instancias16.

En la Tabla 5.7 se muestra la cantidad de instancias en las que el método ALNS pudo alcanzar los valores óptimos arrojados por CPLEX. El grupo de instancias que mayor número de óptimos alcanzó fue *Instancias10* lo que representa el 88%, seguido del grupo *Instancias12* y *Instancias16* con 80% respectivamente; el peor resultado se obtuvo para las *Instancias14* ya que solo llegó al óptimo en el 78% de las soluciones.

	<b>Class10c3d</b>	<b>Class12c3d</b>	<b>Class14c3d</b>	<b>Class16c3d</b>	<b>TOTAL</b>
<b>CPLEX</b>	50/50	49/50	47/50	20/50	167/200
<b>ALNS</b>	44/50	40/49	37/47	16/20	137/167

Tabla 5.7: Número de veces en las que el método reportó mejores valores de la función objetivo.

En Tabla 5.4 se reportan , los tiempos totales de ejecución, en segundos, requeridos por CPLEX y por el ALNS para llegar a las soluciones de cada uno de los

grupos de instancias.

Clases	Tiempos(s)	
	CPLEX	ALNS
Class10c3d	103.03	2.52
Class12c3d	2660.98	2.78
Class14c3d	36758.42	3.22
Class16c3d	131920.70	3.51
<b>TOTAL</b>	171443.13	12.03

Tabla 5.8: Tiempos de ejecución totales, en segundos, requeridos por el optimizador CPLEX y por el ALNS.

#### ANÁLISIS DEL GAP.

Para saber el grado de error de las soluciones factibles obtenidas al aplicar la metodología propuesta con el valor real del óptimo global para el problema, se mide obteniendo la relación entre la solución obtenida y la real, esta se expresa de la siguiente forma:

$$GAP = \frac{Z_{CPLEX} - Z_0}{Z_{CPLEX}} \quad (5.1)$$

Donde:

$Z_{CPLEX}$  : Es una solución óptima al problema.

$Z_0$  : Es una solución factible del problema.

%GAP.- Es el error relativo en porcentaje de nuestra solución

Como la función objetivo es minimizar, un %GAP negativo indica que el valor obtenido por el optimizador es mejor que el obtenido en la metaheurística. Los resultados obtenidos para el ALNS se muestran en la Tabla 5.9 donde se muestra el GAP mínimo, promedio y máximo para cada categoría de instancias.

Clase	Categoría	GAP (%)		
		Min	Prom	Max
<b>Class10c3d</b>	1	0.00	0.00	0.00
	2	-50.00	-10.00	0.00
	3	-33.33	-5.83	0.00
	4	-25.00	-2.50	0.00
	5	-60.00	-6.00	0.00
<b>Class12c3d</b>	1	0.00	0.00	0.00
	2	-33.33	-3.33	0.00
	3	-25.00	-10.00	0.00
	4	-20.00	-3.67	0.00
	5	-28.57	-10.06	0.00
<b>Class14c3d</b>	1	0.00	0.00	0.00
	2	-33.33	-10.00	0.00
	3	-16.67	-1.67	0.00
	4	-20	-3.67	0.00
	5	-16.67	-6.01	0.00
<b>Class16c3d</b>	1	-50	-5.00	0.00
	2	-66.67	-17.50	0.00
	3	-20	-4.00	0.00
	4	-16.67	-13.52	0.00
	5	-28.57	-10.58	0.00

Tabla 5.9: Resultados del ALNS versus CPLEX .

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 6.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia el Problema de la Fuerza de Ventas, en el que se tiene como objetivo minimizar el costo de salario nominal a partir de la definición del tamaño de la fuerza de ventas, necesaria para satisfacer las demandas de los clientes en un horizonte de planificación.

La formulación para el problema, así como el método para obtener la solución inicial fueron tomadas de [26]. Se propuso implementación de una metaheurística tipo ALNS como método de solución y se evaluó su desempeño sobre el conjunto de instancias tomadas también de [26].

Las heurísticas que se proponen, tienen como objetivo disminuir el costo de salario nominal por la contratación de vehículos. Entre los operadores de destrucción logran destacar Eliminación de vecindad y Costo promedio por costo de remoción, esto se debe a que en el primer caso, se elimina el cliente que tiene mayor impacto en la disminución del valor de la función objetivo, realizando una evaluación en la que se tiene presente el costo si el cliente es atendido y el costo después de ser removido. El otro operador elimina la ruta que menor relación costo-demanda presente, este operador permite que al eliminar una ruta estos clientes puedan ser insertados en otras rutas sin aumentar el valor de la función objetivo. Para mejorar el método propuesto, se propone implementar otros resparadores que tengan mayor impacto en

el cumplimiento del objetivo, así como otros destructores.

Los resultados computacionales obtenidos fueron comparados con los valores de CPLEX encontrados en la literatura. Al realizar dicha comparación se refleja los mejores resultados para instancias pequeñas, ya que se alcanzó el 88 % de los óptimos, mientras que para el grupo de instancias grandes existe una mayor brecha de mejora, ya que los óptimos encontrados representan el 80 %. El método propuesto supera a CPLEX con un GAP promedio de 6.17 % utilizando un tiempo computacional de 12.03 s el cual es mucho más pequeño que el requerido por CPLEX. Se encuentran un 82 % de las soluciones óptimas reportadas por CPLEX por lo que se puede decir que se logra un buen desempeño con la implementación de este algoritmos en tiempos computacionales pequeños.

## 6.2 TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, se propone la implementación de nuevas heurísticas de destrucción y reparación que mejoren la calidad de las soluciones encontradas, así como realizar un análisis para identificar cual o cuales son las heurísticas de destrucción y reparación con los que se obtienen las mejores soluciones.

Se puede proponer la implementación de una nueva metaheurística para realizar una comparación de los resultados con los obtenidos en este trabajo, de esta forma se podría identificar que método de solución es el más adecuado para el problema objeto de estudio.



APÉNDICE A  
TABLAS DE RESULTADOS

Tabla A.1: Resultados para el conjunto de Instancias10

Instancias	Constructivo		ALNS		CPLEX		GAP	
	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Constructivo/CPLEX	ALNS/CPLEX
Instance_10.1.3.0	200	0.082	200	0.025	200	0.36	0.00	0.00
Instance_10.1.3.1	200	0.032	200	0.052	200	0.47	0.00	0.00
Instance_10.1.3.2	200	0.021	200	0.02	200	1.06	0.00	0.00
Instance_10.1.3.3	200	0.041	100	0.045	100	0.03	-100	0.00
Instance_10.1.3.4	200	0.035	200	0.029	200	6.13	0.00	0.00
Instance_10.1.3.5	200	0.022	200	0.023	200	4.66	0.00	0.00
Instance_10.1.3.6	200	0.027	200	0.077	200	0.58	0.00	0.00
Instance_10.1.3.7	200	0.096	100	0.027	100	0.02	-100	0.00
Instance_10.1.3.8	200	0.033	200	0.105	200	0.49	0.00	0.00
Instance_10.1.3.9	200	0.035	200	0.031	200	5.49	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>200</b>	<b>0.0424</b>	<b>180</b>	<b>0.0434</b>	<b>180</b>	<b>1.929</b>	<b>-20</b>	<b>0.00</b>
Instance_10.2.3.0	300	0.063	300	0.071	300	0.26	0.00	0.00
Instance_10.2.3.1	300	0.06	300	0.053	300	0.5	0.00	0.00
Instance_10.2.3.2	300	0.071	300	0.059	300	0.55	0.00	0.00
Instance_10.2.3.3	300	0.022	300	0.027	200	0.03	-50	-50
Instance_10.2.3.4	300	0.035	300	0.024	300	3.93	0.00	0.00
Instance_10.2.3.5	300	0.022	300	0.037	300	3.6	0.00	0.00
Instance_10.2.3.6	300	0.049	300	0.036	300	0.53	0.00	0.00
Instance_10.2.3.7	300	0.041	300	0.043	200	0.03	-50	-50
Instance_10.2.3.8	300	0.036	300	0.036	300	0.54	0.00	0.00
Instance_10.2.3.9	300	0.025	300	0.068	300	5.29	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>300</b>	<b>0.0424</b>	<b>300</b>	<b>0.0454</b>	<b>280</b>	<b>1.526</b>	<b>-10</b>	<b>-10</b>
Instance_10.3.3.0	500	0.113	500	0.026	500	0.48	0.00	0.00
Instance_10.3.3.1	400	0.058	400	0.073	400	0.64	0.00	0.00
Instance_10.3.3.2	400	0.03	400	0.045	400	1.06	0.00	0.00
Instance_10.3.3.3	400	0.027	300	0.023	300	0.02	-33.33	0.00
Instance_10.3.3.4	400	0.024	500	0.028	400	7.74	0.00	-25
Instance_10.3.3.5	400	0.033	400	0.041	400	5.41	0.00	0.00
Instance_10.3.3.6	400	0.027	400	0.028	400	0.55	0.00	0.00
Instance_10.3.3.7	400	0.048	400	0.049	300	0.02	-33.33	-33.33
Instance_10.3.3.8	400	0.043	400	0.051	400	0.61	0.00	0.00
Instance_10.3.3.9	400	0.034	400	0.074	400	5.18	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>410</b>	<b>0.0437</b>	<b>410</b>	<b>0.0438</b>	<b>390</b>	<b>2.171</b>	<b>-6.67</b>	<b>-5.83</b>
Instance_10.4.3.0	500	0.068	500	0.049	500	0.25	0.00	0.00
Instance_10.4.3.1	600	0.043	600	0.026	600	0.69	0.00	0.00
Instance_10.4.3.2	500	0.073	500	0.042	500	2.5	0.00	0.00
Instance_10.4.3.3	500	0.03	500	0.056	400	0.02	-25	-25
Instance_10.4.3.4	500	0.031	500	0.057	500	3.55	0.00	0.00
Instance_10.4.3.5	500	0.033	500	0.041	500	4.77	0.00	0.00
Instance_10.4.3.6	600	0.038	500	0.035	500	0.78	-20	0.00
Instance_10.4.3.7	500	0.033	400	0.075	400	0.03	-25	0.00
Instance_10.4.3.8	700	0.071	700	0.024	700	2.92	0.00	0.00
Instance_10.4.3.9	600	0.046	600	0.081	600	6.81	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>550</b>	<b>0.0466</b>	<b>530</b>	<b>0.0486</b>	<b>520</b>	<b>2.232</b>	<b>-7</b>	<b>-2.5</b>
Instance_10.5.3.0	900	0.044	700	0.064	700	0.45	-28.57	0.00
Instance_10.5.3.1	800	0.033	700	0.081	700	0.44	-14.29	0.00
Instance_10.5.3.2	800	0.116	800	0.047	800	3	0.00	0.00
Instance_10.5.3.3	800	0.023	800	0.158	500	0.02	-60	-60
Instance_10.5.3.4	600	0.085	600	0.098	600	6.49	0.00	0.00
Instance_10.5.3.5	600	0.069	600	0.03	600	6.02	0.00	0.00
Instance_10.5.3.6	800	0.03	700	0.067	700	2.04	-14.29	0.00
Instance_10.5.3.7	600	0.035	500	0.03	500	0.02	-20	0.00
Instance_10.5.3.8	600	0.048	600	0.048	600	0.58	0.00	0.00
Instance_10.5.3.9	600	0.09	600	0.081	600	5.39	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>710</b>	<b>0.0573</b>	<b>660</b>	<b>0.0704</b>	<b>630</b>	<b>2.445</b>	<b>-13.71</b>	<b>-6</b>

Tabla A.2: Resultados para el conjunto de Instancias10

Instancias	Constructivo		ALNS		CPLEX		GAP	
	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Constructivo/CPLEX	ALNS/CPLEX
Instance_12.1.3.0	200	0.031	200	0.061	200	3.61	0.00	0.00
Instance_12.1.3.1	200	0.044	200	0.058	200	19.16	0.00	0.00
Instance_12.1.3.2	200	0.039	200	0.063	200	73.35	0.00	0.00
Instance_12.1.3.3	200	0.022	200	0.03	200	88.49	0.00	0.00
Instance_12.1.3.4	200	0.023	200	0.022	200	4.96	0.00	0.00
Instance_12.1.3.5	200	0.035	200	0.023	200	1.96	0.00	0.00
Instance_12.1.3.6	200	0.027	200	0.034	200	18.19	0.00	0.00
Instance_12.1.3.7	200	0.038	200	0.038	200	61.04	0.00	0.00
Instance_12.1.3.8	300	0.035	200	0.064	200	0.33	-50	0.00
Instance_12.1.3.9	200	0.025	200	0.037	200	51.91	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>210</b>	<b>0.0319</b>	<b>200</b>	<b>0.043</b>	<b>200</b>	<b>32.3</b>	<b>-5.00</b>	<b>0.00</b>
Instance_12.2.3.0	300	0.035	400	0.093	300	0.81	0.00	-33.33
Instance_12.2.3.1	400	0.026	300	0.034	300	23.31	-33.33	0.00
Instance_12.2.3.2	300	0.025	300	0.029	300	19.48	0.00	0.00
Instance_12.2.3.3	300	0.035	300	0.039	300	176.13	0.00	0.00
Instance_12.2.3.4	300	0.032	300	0.033	300	57.1	0.00	0.00
Instance_12.2.3.5	300	0.023	300	0.026	300	1.74	0.00	0.00
Instance_12.2.3.6	300	0.041	300	0.028	300	24.17	0.00	0.00
Instance_12.2.3.7	300	0.033	300	0.146	300	66.29	0.00	0.00
Instance_12.2.3.8	400	0.051	400	0.043	400	0.58	0.00	0.00
Instance_12.2.3.9	300	0.041	300	0.033	300	6.49	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>320</b>	<b>0.0342</b>	<b>320</b>	<b>0.0504</b>	<b>310</b>	<b>37.61</b>	<b>-3.33</b>	<b>-3.33</b>
Instance_12.3.3.0	500	0.054	500	0.045	500	18.32	0.00	0.00
Instance_12.3.3.1	500	0.034	400	0.067	400	32.86	-25.00	0.00
Instance_12.3.3.2	400	0.03	400	0.034	400	77.78	0.00	0.00
Instance_12.3.3.3	500	0.093	500	0.068	400	136.84	-25.00	-25.00
Instance_12.3.3.4	500	0.055	500	0.043	400	51.8	-25.00	-25.00
Instance_12.3.3.5	400	0.04	400	0.046	400	60.31	0.00	0.00
Instance_12.3.3.6	400	0.054	400	0.066	400	22.53	0.00	0.00
Instance_12.3.3.7	500	0.072	500	0.045	400	64.78	-25.00	-25.00
Instance_12.3.3.8	600	0.031	500	0.093	500	1.58	-20.00	0.00
Instance_12.3.3.9	500	0.031	500	0.029	400	6.81	-25.00	-25.00
<b>Promedio</b>	<b>480</b>	<b>0.0494</b>	<b>460</b>	<b>0.0536</b>	<b>420</b>	<b>47.361</b>	<b>-14.50</b>	<b>-10.00</b>
Instance_12.4.3.0	500	0.071	500	0.061	500	0.91	0.00	0.00
Instance_12.4.3.1	600	0.042	600	0.068	600	56.04	0.00	0.00
Instance_12.4.3.2	600	0.065	600	0.134	600	127.17	0.00	0.00
Instance_12.4.3.3	500	0.032	500	0.053	500	242.04	0.00	0.00
Instance_12.4.3.4	500	0.041	500	0.054	500	62.19	0.00	0.00
Instance_12.4.3.5	600	0.065	500	0.031	500	69.41	-20.00	0.00
Instance_12.4.3.6	600	0.071	500	0.035	500	31.7	-20.00	0.00
Instance_12.4.3.7	700	0.034	700	0.049	600	42.51	-16.67	-16.67
Instance_12.4.3.8	800	0.069	800	0.048	800	1.36	0.00	0.00
Instance_12.4.3.9	600	0.034	600	0.038	500	175.23	-20.00	-20.00
<b>Promedio</b>	<b>600</b>	<b>0.0524</b>	<b>580</b>	<b>0.0571</b>	<b>560</b>	<b>80.856</b>	<b>-7.67</b>	<b>-3.67</b>
Instance_12.5.3.0	900	0.031	900	0.091	700	8.88	-28.57	-28.57
Instance_12.5.3.1	800	0.045	800	0.027	800	23.98	0.00	0.00
Instance_12.5.3.2	800	0.038	800	0.118	700	71.27	-14.29	-14.29
Instance_12.5.3.3	700	0.056	700	0.085	700	76.97	0.00	0.00
Instance_12.5.3.4	700	0.091	800	0.137	700	55.01	0.00	-14.29
Instance_12.5.3.5	700	0.028	700	0.039	600	50.47	-16.67	-16.67
Instance_12.5.3.6	800	0.074	800	0.045	800	47.27	0.00	0.00
Instance_12.5.3.7	800	0.047	600	0.069	600	256.3	-33.33	0.00
Instance_12.5.3.8	700	0.058	800	0.063	700	0.96	0.00	-14.29
Instance_12.5.3.9	900	0.047	900	0.069	800	88.6	-12.50	-12.50
<b>Promedio</b>	<b>780</b>	<b>0.0515</b>	<b>780</b>	<b>0.0743</b>	<b>710</b>	<b>67.971</b>	<b>-10.54</b>	<b>-10.06</b>

Tabla A.3: Resultados para el conjunto de Instancias10

Instancias	Constructivo		ALNS		CPLEX		GAP	
	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Constructivo/CPLEX	ALNS/CPLEX
Instance_14.1.3.0	200	0.05	200	0.087	200	24.53	0.00	0.00
Instance_14.1.3.1	200	0.047	200	0.06	200	2.34	0.00	0.00
Instance_14.1.3.2	200	0.083	200	0.027	200	584.9	0.00	0.00
Instance_14.1.3.3	200	0.035	200	0.082	200	254.92	0.00	0.00
Instance_14.1.3.4	200	0.031	200	0.182	200	55.12	0.00	0.00
Instance_14.1.3.5	200	0.053	200	0.079	200	2.62	0.00	0.00
Instance_14.1.3.6	200	0.042	200	0.052	200	73.55	0.00	0.00
Instance_14.1.3.7	200	0.045	200	0.061	200	205.79	0.00	0.00
Instance_14.1.3.8	300	0.042	300	0.035	300	3593.14	0.00	0.00
Instance_14.1.3.9	200	0.053	200	0.066	200	89.2	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>210</b>	<b>0.0481</b>	<b>210</b>	<b>0.0731</b>	<b>210</b>	<b>488.611</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
Instance_14.2.3.0	300	0.044	300	0.065	300	2.24	0.00	0.00
Instance_14.2.3.1	400	0.068	400	0.085	400	907.22	0.00	0.00
Instance_14.2.3.2	300	0.07	400	0.033	300	1291.12	0.00	-33.33
Instance_14.2.3.3	300	0.071	300	0.082	300	368.76	0.00	0.00
Instance_14.2.3.4	400	0.059	400	0.061	300	187.84	-33.33	-33.33
Instance_14.2.3.5	300	0.04	300	0.035	300	544.67	0.00	0.00
Instance_14.2.3.6	400	0.095	400	0.054	300	203.22	-33.33	-33.33
Instance_14.2.3.7	300	0.046	300	0.076	300	1342.76	0.00	0.00
Instance_14.2.3.8	500	0.048	500	0.096	500	3570.11	0.00	0.00
Instance_14.2.3.9	300	0.036	300	0.068	300	13.16	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>350</b>	<b>0.0577</b>	<b>360</b>	<b>0.0655</b>	<b>330</b>	<b>843.11</b>	<b>-6.67</b>	<b>-10.00</b>
Instance_14.3.3.0	500	0.073	500	0.04	500	444.68	0.00	0.00
Instance_14.3.3.1	500	0.056	500	0.06	500	3591.17	0.00	0.00
Instance_14.3.3.2	400	0.046	400	0.088	400	2931.69	0.00	0.00
Instance_14.3.3.3	500	0.093	500	0.057	500	2738.21	0.00	0.00
Instance_14.3.3.4	500	0.066	500	0.037	500	417.29	0.00	0.00
Instance_14.3.3.5	500	0.07	500	0.073	500	1489.71	0.00	0.00
Instance_14.3.3.6	600	0.06	500	0.09	500	298.8	-20.00	0.00
Instance_14.3.3.7	500	0.09	500	0.076	500	93.03	0.00	0.00
Instance_14.3.3.8	600	0.042	700	0.056	600	91.64	0.00	-16.67
Instance_14.3.3.9	500	0.065	500	0.109	500	1003.56	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>510</b>	<b>0.0661</b>	<b>510</b>	<b>0.0686</b>	<b>500</b>	<b>1309.978</b>	<b>-2.00</b>	<b>-1.67</b>
Instance_14.4.3.0	500	0.086	500	0.128	500	4.76	0.00	0.00
Instance_14.4.3.1	600	0.045	600	0.081	600	228.02	0.00	0.00
Instance_14.4.3.2	600	0.028	600	0.03	600	570.3	0.00	0.00
Instance_14.4.3.3	600	0.034	600	0.063	500	331.27	-20.00	-20.00
Instance_14.4.3.4	800	0.059	500	0.097	500	51.88	-60.00	0.00
Instance_14.4.3.5	700	0.036	700	0.047	600	674.13	-16.67	-16.67
Instance_14.4.3.6	700	0.073	600	0.112	600	46.11	-16.67	0.00
Instance_14.4.3.7	700	0.036	700	0.04	700	437.63	0.00	0.00
Instance_14.4.3.8	900	0.08	900	0.071	900	3049.72	0.00	0.00
Instance_14.4.3.9	600	0.045	600	0.039	600	475.54	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>670</b>	<b>0.0522</b>	<b>630</b>	<b>0.0708</b>	<b>610</b>	<b>586.936</b>	<b>-11.33</b>	<b>-3.67</b>
Instance_14.5.3.0	900	0.063	700	0.05	700	104.94	-28.57	0.00
Instance_14.5.3.1	800	0.07	800	0.048	800	483.04	0.00	0.00
Instance_14.5.3.2	800	0.035	800	0.034	800	1083.07	0.00	0.00
Instance_14.5.3.3	800	0.083	700	0.035	700	290.47	-14.29	0.00
Instance_14.5.3.4	900	0.08	800	0.047	700	54.32	-28.57	-14.29
Instance_14.5.3.5	800	0.042	700	0.039	600	91.48	-33.33	-16.67
Instance_14.5.3.6	800	0.031	800	0.034	800	845.33	0.00	0.00
Instance_14.5.3.7	700	0.041	700	0.061	600	1170.9	-16.67	-16.67
Instance_14.5.3.8	800	0.042	800	0.055	800	80.48	0.00	0.00
Instance_14.5.3.9	900	0.048	900	0.036	800	268.04	-12.50	-12.50
<b>Promedio</b>	<b>820</b>	<b>0.0535</b>	<b>770</b>	<b>0.0439</b>	<b>730</b>	<b>447.207</b>	<b>-13.39</b>	<b>-6.01</b>

Tabla A.4: Resultados para el conjunto de Instancias10

Instancias	Constructivo		ALNS		CPLEX		GAP	
	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Objetivo	Tiempo(s)	Constructivo/CPLEX	ALNS/CPLEX
Instance_16.1.3.0	300	0.063	300	0.039	300	3360.98	0.00	0.00
Instance_16.1.3.1	200	0.051	200	0.062	200	12.99	0.00	0.00
Instance_16.1.3.2	200	0.051	200	0.043	200	153.11	0.00	0.00
Instance_16.1.3.3	200	0.054	200	0.052	200	552.7	0.00	0.00
Instance_16.1.3.4	300	0.045	300	0.047	200	883.51	-50.00	-50.00
Instance_16.1.3.5	300	0.034	200	0.048	200	7.81	-50.00	0.00
Instance_16.1.3.6	300	0.04	300	0.044	300	3159.08	0.00	0.00
Instance_16.1.3.7	200	0.076	200	0.054	200	66.27	0.00	0.00
Instance_16.1.3.8	300	0.049	300	0.053	300	3599.8	0.00	0.00
Instance_16.1.3.9	200	0.09	200	0.106	200	723.57	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>250</b>	<b>0.0553</b>	<b>240</b>	<b>0.0548</b>	<b>230</b>	<b>1251.982</b>	<b>-10.00</b>	<b>-5.00</b>
Instance_16.2.3.0	500	0.061	500	0.067	400	1750.47	-25.00	-25.00
Instance_16.2.3.1	400	0.137	500	0.117	400	3599.8	0.00	-25.00
Instance_16.2.3.2	500	0.088	500	0.058	400	3599.75	-25.00	-25.00
Instance_16.2.3.3	400	0.047	400	0.076	400	3599.76	0.00	0.00
Instance_16.2.3.4	400	0.057	400	0.1	300	1087.87	-33.33	-33.33
Instance_16.2.3.5	500	0.082	400	0.049	400	3599.81	-25.00	0.00
Instance_16.2.3.6	500	0.073	500	0.083	500	3587.94	0.00	0.00
Instance_16.2.3.7	300	0.078	300	0.049	300	3518.85	0.00	0.00
Instance_16.2.3.8	500	0.086	500	0.069	500	3599.7	0.00	0.00
Instance_16.2.3.9	500	0.07	500	0.059	300	2742.63	-66.67	-66.67
<b>Promedio</b>	<b>450</b>	<b>0.0779</b>	<b>450</b>	<b>0.0727</b>	<b>390</b>	<b>3068.658</b>	<b>-17.50</b>	<b>-17.50</b>
Instance_16.3.3.0	600	0.072	600	0.088	600	3599.78	0.00	0.00
Instance_16.3.3.1	600	0.061	500	0.05	500	1060.77	-20.00	0.00
Instance_16.3.3.2	500	0.052	600	0.048	500	3599.78	0.00	-20.00
Instance_16.3.3.3	600	0.061	500	0.043	500	2824.02	-20.00	0.00
Instance_16.3.3.4	600	0.043	600	0.048	500	3599.78	-20.00	-20.00
Instance_16.3.3.5	600	0.082	500	0.055	500	3597.84	-20.00	0.00
Instance_16.3.3.6	700	0.077	600	0.057	600	3587.31	-16.67	0.00
Instance_16.3.3.7	500	0.12	500	0.097	500	3579.51	0.00	0.00
Instance_16.3.3.8	700	0.083	700	0.076	700	3590.45	0.00	0.00
Instance_16.3.3.9	600	0.111	600	0.079	600	1058.43	0.00	0.00
<b>Promedio</b>	<b>600</b>	<b>0.0762</b>	<b>570</b>	<b>0.0641</b>	<b>550</b>	<b>3009.767</b>	<b>-9.67</b>	<b>-4.00</b>
Instance_16.4.3.0	800	0.075	800	0.095	700	3585.28	-14.29	-14.29
Instance_16.4.3.1	600	0.074	600	0.071	600	1419.99	0.00	0.00
Instance_16.4.3.2	800	0.075	700	0.051	600	641.63	-33.33	-16.67
Instance_16.4.3.3	600	0.069	700	0.093	600	3575.52	0.00	-16.67
Instance_16.4.3.4	900	0.044	700	0.046	500	1544.66	-80.00	-40.00
Instance_16.4.3.5	800	0.053	700	0.059	600	3588.66	-33.33	-16.67
Instance_16.4.3.6	800	0.064	800	0.062	700	3599.66	-14.29	-14.29
Instance_16.4.3.7	700	0.069	700	0.051	700	3599.7	0.00	0.00
Instance_16.4.3.8	1000	0.051	1000	0.068	1000	3599.35	0.00	0.00
Instance_16.4.3.9	800	0.068	700	0.075	600	2293.85	-33.33	-16.67
<b>Promedio</b>	<b>780</b>	<b>0.0642</b>	<b>740</b>	<b>0.0671</b>	<b>660</b>	<b>2744.83</b>	<b>-20.86</b>	<b>-13.52</b>
Instance_16.5.3.0	1000	0.077	1000	0.12	1000	3527.18	0.00	0.00
Instance_16.5.3.1	1000	0.053	1000	0.078	800	3599.7	-25.00	-25.00
Instance_16.5.3.2	1000	0.089	800	0.162	800	1485.07	-25.00	0.00
Instance_16.5.3.3	1000	0.054	900	0.065	800	3599.7	-25.00	-12.50
Instance_16.5.3.4	900	0.071	900	0.042	700	958.31	-28.57	-28.57
Instance_16.5.3.5	900	0.042	900	0.098	700	3599.72	-28.57	-28.57
Instance_16.5.3.6	1000	0.048	1000	0.079	900	3599.63	-11.11	-11.11
Instance_16.5.3.7	800	0.039	700	0.127	700	3599.69	-14.29	0.00
Instance_16.5.3.8	900	0.045	900	0.068	900	3599.72	0.00	0.00
Instance_16.5.3.9	1000	0.046	900	0.081	900	3599.61	-11.11	0.00
<b>Promedio</b>	<b>950</b>	<b>0.0564</b>	<b>900</b>	<b>0.092</b>	<b>820</b>	<b>3116.833</b>	<b>-16.87</b>	<b>-10.58</b>

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] ADRIANA LOZADA, D. R., *Solución del Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo VRPTW mediante Metodos Heuristicos*, Tesis Doctoral, 2012.
- [2] AKSEN, D., O. KAYA, F. S. SALMAN y Ö. TÜNCEL, «An adaptive large neighborhood search algorithm for a selective and periodic inventory routing problem», *European Journal of Operational Research*, **239**(2), págs. 413–426, 2014.
- [3] ARCHETTI, C., E. FERNANDEZ y D. HUERTA-MUÑOZ, «The Flexible Periodic Vehicle Routing Problem», *Computers and Operations Research*, **85**, 03 2017.
- [4] BALL, M. O., B. GOLDEN, A. ASSAD y L. BODIN, «Planning for truck fleet size in the presence of a common-carrier option», *Decision Sciences*, **14**(1), págs. 103–120, 1983.
- [5] BAZARAA, M. S., J. J. JARVIS y H. D. SHERALI, *Programación lineal y flujo en redes*, segunda edición, Limusa, México, DF, 2004.
- [6] BELFIORE, P. y H. T. YOSHIKAZI, «Heuristic methods for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and split deliveries», *Computers & Industrial Engineering*, **64**(2), págs. 589–601, 2013.
- [7] BELTRAMI, E. J. y L. D. BODIN, «Networks and vehicle routing for municipal waste collection», *Networks*, **4**(1), págs. 65–94, 1974.

- 
- [8] CHRISTOFIDES, N. y S. EILON, «An algorithm for the vehicle-dispatching problem», *Journal of the Operational Research Society*, **20**(3), págs. 309–318, 1969.
- [9] CRUZ, M. A., «Un Mecanismo de Vecindad con Búsqueda Local y Algoritmo Genético para el Problema de Transporte con Ventanas de Tiempo», *Programación Matemática y Software*, 2009.
- [10] DANTZIG, G. B., «Reminiscences about the origins of linear programming», *Operations Research Letters*, **1**(2), págs. 43–48, 1982.
- [11] DANTZIG, G. B. y J. H. RAMSER, «The truck dispatching problem», *Management science*, **6**(1), págs. 80–91, 1959.
- [12] DE ARMAS, J., B. MELIÁN-BATISTA, J. A. MORENO-PÉREZ y J. BRITO, «GVNS for a real-world rich vehicle routing problem with time windows», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **42**, págs. 45–56, 2015.
- [13] EL-SHERBENY, N. A., «Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods», *Journal of King Saud University-Science*, **22**(3), págs. 123–131, 2010.
- [14] GOLDEN, B., A. ASSAD, L. LEVY y F. GHEYSENS, «The fleet size and mix vehicle routing problem», *Computers & Operations Research*, **11**(1), págs. 49–66, 1984.
- [15] GUILLÉN, E., *Análisis de los métodos de construcción de rutas en los sistemas de planificación para el problema del VRPTW*, Tesis Doctoral, Tesis Doctoral, Departamento de Análisis Económico y Administración, 2003.
- [16] HIERMANN, G., J. PUCHINGER, S. ROPKE y R. F. HARTL, «The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations», *European Journal of Operational Research*, **252**(3), págs. 995–1018, 2016.

- [17] JUAN SEPÁ<sup>o</sup>LVEDA, J. W. E. . W. A.-J., «An algorithm for the routing problem with split deliveries and time windows (SDVRPTW) applied on retail SME distribution activities», , 2014.
- [18] KOÇ, Ç., T. BEKTAŞ, O. JABALI y G. LAPORTE, «The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm», *European Journal of Operational Research*, **248**(1), págs. 33–51, 2016.
- [19] LÓPEZ AGUILAR, E., *Formulaciones lineales del problema de ruteo de vehículos con restricciones de sincronización.*, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2015.
- [20] MARTÍ, R. y J. M. M. VEGA, «Métodos multiarranque», *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, **7**(19), pág. 0, 2003.
- [21] MATA, M., «Bibliografía en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X: Una guía concisa de B<sub>I</sub>B<sub>T</sub>E<sub>X</sub>», recurso libre, disponible en <http://it.ciidit.uanl.mx/~miguel/BibTeX.pdf>, 2007.
- [22] NAGLE, S. K. y R. PANNEERSELVAM, «Study of Crossover operators of Genetic Algorithm& Development of New Crossover Operator to Solve Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows», *International Journal of Production Technology and Management (IJPTM)*, **9**(2), 2018.
- [23] PABLO ORREGO, J., D. OSPINA-TORO y E. TORO, «Solution to the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) using a metaheuristic technique», *Scientia et Technica*, **21**, págs. 225–233, 09 2016.
- [24] POTVIN, J.-Y. y J.-M. ROUSSEAU, «A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows», *European Journal of Operational Research*, **66**(3), págs. 331–340, 1993.
- [25] ROPKE, S. y D. PISINGER, «An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows», *Transportation science*, **40**(4), págs. 455–472, 2006.

- 
- [26] SALAZAR-AGUILAR, M. A., V. BOYER, R. S. NIGENDA y I. A. MARTÍNEZ-SALAZAR, «The sales force sizing problem with multi-period workload assignments, and service time windows», *Central European Journal of Operations Research*, págs. 1–20, 2019.
- [27] SALHI, S., N. WASSAN y M. HAJARAT, «The fleet size and mix vehicle routing problem with backhauls: Formulation and set partitioning-based heuristics», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **56**, págs. 22–35, 2013.
- [28] SOLIS, I., «Proyección Logística: de México hacia el mundo», , 2019.
- [29] TOTH, P. y D. VIGO, *The vehicle routing problem*, SIAM, 2002.

# FICHA AUTOBIOGRÁFICA

---

Dania Danielles Suárez Suárez

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería  
con Orientación en Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

HEURÍSTICAS PARA EL PROBLEMA DE  
DETERMINACIÓN DE LA FUERZA DE VENTAS.

Nací en La Habana, Cuba el 22 de enero de 1993, hija de Tania Suárez y Luis Suárez.

Comencé mis estudios en la escuela primaria “Boris Luis Santa Coloma” en el período 1999-2005, durante los años 2005-2008 cursé estudios en la secundaria “José María Heredia” para luego realizar el bachillerato en el IPVCE “Vladimir Ilich Lenin” en el período 2008-2012.

En el año 2017 obtuve el título de Ingeniera Industrial en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE.