

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS PARA UNA EMPRESA
QUE BRINDA SERVICIOS DE PAQUETERÍA,
MENSAJERÍA Y LOGÍSTICA

POR

DORY ANGÉLICA ALVAREZ PORRAS

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

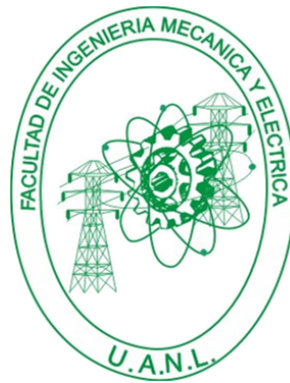
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS PARA UNA EMPRESA
QUE BRINDA SERVICIOS DE PAQUETERÍA,
MENSAJERÍA Y LOGÍSTICA

POR

DORY ANGÉLICA ALVAREZ PORRAS

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2014

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Diseño óptimo de rutas para una empresa que brinda servicios de paquetería, mensajería y logística», realizada por la alumna Dory Angélica Alvarez Porras, con número de matrícula 1286363, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dra. Sara Verónica Rodríguez Sánchez

Director

Dra. María Angélica Salazar Aguilar

Revisor

Dr. Gregorio Tirado Domínguez

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio 2014

*A todas las personas que me brindaron su apoyo durante la realización de este
trabajo.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	x
Resumen	xii
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos	3
1.5. Estructura de la tesis	3
2. Antecedentes	5
2.1. El problema de ruteo de vehículos	6
2.2. Variantes del problema de ruteo de vehículos	7
3. Formulación matemática	14
3.1. Descripción del problema	14
3.2. Parámetros	17

3.3. Variables de decisión	18
3.4. Modelo Matemático	19
3.5. Experimentación del modelo matemático y conclusiones	22
4. Metodología de solución	31
5. Experimentación computacional	37
5.1. Instancias	37
5.2. Experimentación	39
6. Conclusiones y trabajo futuro	51
6.1. Conclusiones	51
6.2. Trabajo futuro	52

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Ejemplo del problema de ruteo de vehículos básico	6
2.2. Variantes del problema de ruteo de vehículos	7
3.1. Proceso realizado en el depósito	15
3.2. Ubicación de clientes en C1	23
3.3. Ubicación de clientes en C2	23
3.4. Ubicación de clientes en R1	24
3.5. Ubicación de clientes en R2	24
3.6. Ubicación de clientes en RC1	25
3.7. Ubicación de clientes en RC2	25
3.8. Porcentaje de instancias de 10 clientes con solución óptima o factible encontrada y solución no encontrada	28
3.9. Porcentaje de instancias de 25 clientes con solución óptima o factible encontrada y solución no encontrada	28
3.10. Diferencias en número de instancias con solución y sin solución para 10 clientes.	29
3.11. Diferencias en número de instancias con solución y sin solución para 25 clientes.	29

4.1. Algoritmo el vecino más cercano	32
4.2. Pretención de nuestro algoritmo	33
4.3. Esquema de una iteración del constructivo	35
5.1. Tiempos de ejecución de las instancias del grupo C1.	40
5.2. Tiempos de ejecución de las instancias del grupo C2.	40
5.3. Tiempos de ejecución de las instancias del grupo R1.	41
5.4. Tiempos de ejecución de las instancias del grupo R2.	41
5.5. Tiempos de ejecución de las instancias del grupo RC1.	42
5.6. Tiempos de ejecución de las instancias del grupo RC2.	42
5.7. Diagrama solución algoritmo CA	50
5.8. Diagrama solución algoritmo CSA	50

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Recopilación de artículos	12
3.1. GAP y Tiempo de ejecución de las instancias de 10 clientes	27
3.2. Número de restricciones y variables de cada grupo de instancias	30
5.1. Características de las instancias	38
5.2. Soluciones encontradas para las instancias con 25 clientes	44
5.3. Soluciones encontradas para las instancias con 50 clientes	45
5.4. Soluciones encontradas para las instancias con 100 clientes	46
5.5. Número de vehículos usados en los 2 algoritmos	47
5.6. Comparación entre heurísticas	48

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. Sara por permitirme trabajar con ella, confiarme este proyecto y el apoyo que he recibido a lo largo de mi estancia en el posgrado. La independencia y confianza que me brindó.

A los profesores del PISIS, por aceptarme en este posgrado, por sus enseñanzas. A la Dra. Angélica por aceptar ser parte de mi comité de tesis. Al Dr. Fernando López por su orientación. Y de igual manera, agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por el apoyo dado en becas.

También agradezco al Dr. Gregorio Tirado Domínguez por aceptar ser parte de mi comité y la aceptación y el trato brindado en la estancia que realicé en la Universidad Complutense de Madrid.

Un especial agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de manutención y la beca mixta que me otorgó para la realización de mis estudios y estancia en el extranjero.

A mis compañeros de generación, a Christopher por su apoyo y motivación. Gracias.

A mis padres y hermanos que siempre me apoyan y están conmigo.

RESUMEN

Dory Angélica Alvarez Porras.

Candidata para el grado de Maestría en Ciencias
con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS PARA UNA EMPRESA
QUE BRINDA SERVICIOS DE PAQUETERÍA,
MENSAJERÍA Y LOGÍSTICA

Número de páginas: 58.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Este trabajo propone un modelo matemático para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, entregas divididas y flota heterogénea. Este problema tiene como objetivo el diseño de un conjunto de rutas que una flota de vehículos seguirán para servir a un conjunto de clientes con requerimiento de demanda que podrá dividirse en varios viajes. Esto, con el fin de encontrar el mejor diseño del conjunto de rutas en cuanto al costo total de operación.

Se presenta el estado del arte del problema, y la descripción de algunos de los métodos utilizados. Se presenta la metodología de solución, su correspondiente

experimentación, y las conclusiones obtenidas al implementar el método.

Como objetivo principal, se considera dar solución al problema planteado para ofrecer un algoritmo de solución a la compañía de la cual se basa el problema de estudio en este proyecto de tesis. Además de estudiar el problema de ruteo de vehículos, tanto en su versión básica, como con las variantes que se toman en este trabajo.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: El problema de ruteo de vehículos con las variantes mencionadas en el punto anterior, ha sido muy poco estudiado y solo se tiene, bajo nuestro conocimiento, una metodología que resuelve este tipo de problema. Es por eso que una de las contribuciones más importantes es la metodología propuesta para la resolución del problema. Además, se tiene contemplado la implementación del algoritmo en un caso real para una empresa de logística.

Firma del asesor: _____

Dra. Sara Verónica Rodríguez Sánchez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte es uno de los componentes más importantes para la mayoría de las organizaciones, además que es uno de los puntos clave para la satisfacción de los clientes, sin embargo, es uno de los que genera los costos logísticos más elevados. Por tanto, una reducción en los costos de transporte representa un gran beneficio para las organizaciones.

El tema que se estudia en la presente tesis se deriva de la problemática que se presenta en una empresa que brinda servicios de mensajería, paquetería y logística a nivel nacional e internacional. La empresa tiene su CEDI (centro de distribución) en Monterrey, Nuevo León, México; el cual opera para la zona noreste de la república mexicana. La empresa ofrece dos tipos de servicios: entrega y recolecciones. Siendo de nuestro interés el servicio de entrega.

El servicio de entrega, como su nombre lo dice, consiste en entregar a los clientes de la empresa sus respectivos paquetes o mensajería, teniendo en cuenta ciertas características que presenta la operación de dicho servicio. Al estudiar el problema y las características que presenta, se puede clasificar como un problema de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés, *Vehicle Routing Problem*), que junto con algunas de sus variantes, describe la problemática de la compañía.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, flota heterogénea y entregas divididas, consiste en diseñar un conjunto de rutas óptimas a usar por un conjunto de vehículos disponibles en el depósito, en este caso con vehículos heterogéneos, con el fin de servir a un conjunto de clientes que están esparcidos geográficamente. Con la característica que un cliente podrá ser visitado más de una vez y su demanda puede exceder la capacidad de los vehículos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Primeramente, la relevancia de este proyecto se debe a que proviene de una problemática real y su resolución conllevó a un análisis por parte de la gerencia de la empresa para continuar con un proyecto de implementación. Otro punto no menos importante, es que acorde con la revisión bibliográfica realizada, se tiene conocimiento de solo un trabajo que aborda las 3 variantes del problema de ruteo de vehículos que se presenta en este proyecto.

1.3 HIPÓTESIS

Dadas las características del problema abordado, se pretende que la heurística propuesta dé solución a la problemática de la organización y mejore lo que han utilizado hasta ahora.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es estudiar el problema de ruteo de vehículos en un caso real, además de proponer una metodología de solución que sea capaz de brindar soluciones atractivas para la empresa, de forma que se mejore el rendimiento de las rutas que han sido utilizadas durante los últimos años. Como objetivos adicionales se tienen los siguientes:

- Revisión bibliográfica de publicaciones relacionadas con el problema de estudio.
- Propuesta de un modelo matemático que represente la problemática de estudio.
- Experimentación tanto del modelo propuesto como del algoritmo de solución para medir su desempeño.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La estructura del presente trabajo es la siguiente: en el capítulo dos se describe el problema de ruteo de vehículos y sus principales variantes. Además, en cada una de las variantes se detallan algunos ejemplos de la bibliografía encontrada, resaltando la metodología utilizada.

En el capítulo tres se plantea el problema de estudio, se muestra el modelo matemático propuesto para la problemática y se presentan algunas conclusiones sobre la experimentación con el modelo matemático.

El capítulo cuatro está destinado a la descripción de la metodología implementada para dar solución al problema de estudio. Se trata de un procedimiento

constructivo multiarranque en el que cada iteración se basa en la heurística del vecino más cercano con aleatoriedad.

En el capítulo cinco, se presenta la experimentación llevada a cabo con el método descrito en el capítulo cuatro, y además una comparativa entre el método descrito en el capítulo 4 y su versión estándar.

Para terminar, en el capítulo seis se muestran las conclusiones obtenidas tanto del comportamiento de la heurística así como del punto de vista del gerente de la empresa paquetera en relación al trabajo abordado.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

El problema de ruteo de vehículos es uno de los problemas de optimización combinatoria más estudiados en la literatura. Está presente en un gran número de aplicaciones tanto en situaciones de la industria como en el sector servicios. Este problema nació como una generalización del problema del agente viajero (TSP, por sus siglas en inglés, *Traveling Salesman Problem*), en el TSP, un agente que parte de una ciudad, desea visitar las $n-1$ ciudades restantes una sola vez y regresar a la ciudad de partida, con el objetivo de minimizar la distancia (tiempo, costo, etc.) total del viaje.[13]

En 1959, Dantzig y Ramser[14] se enfrentaron a la problemática de transportar gasolina con una flotilla de tráileres entre una terminal de carga y un gran número de estaciones de servicio suministrados por la terminal, para el estudio del problema los autores propusieron una formulación de programación lineal. Después de esta publicación se han presentado gran cantidad de aportaciones al problema, en los cuales se estudia con una variedad de objetivos, tales como, la minimización del costo total de operación, longitud total de la ruta, longitud de la ruta más larga, tiempo total de ruta, número de vehículos, tiempo de espera, entre otros.

Su impacto ha sido tan fuerte que se recurre a su aplicación en grandes organizaciones. Una buena planificación de la distribución de productos puede significar considerables ahorros en la gestión de sistemas logísticos. Siendo las técnicas en in-

investigación de operaciones y programación matemática la causa de estos ahorros que oscilan entre el 5% y el 20% de los costos totales de transportación [38].

2.1 EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

El problema de ruteo de vehículos consiste en encontrar una colección de rutas óptimas, a usar por una flotilla de vehículos, para servir (realizar la entrega) a un conjunto de clientes con demanda y localización geográfica conocidas, con el objetivo de minimizar el costo de transportación.

En la Figura 2.1 se puede ver la forma que presenta una solución al problema de ruteo de vehículos. Debido a que en la realidad los vehículos tienen cierta capacidad de carga, se agrega esta característica como limitante, dando paso al Problema de Ruteo de Vehículos Capacitado (CVRP). Para realizar la entrega de la demanda de los clientes, los vehículos deben partir y regresar al depósito. Si un vehículo visita a un cliente, solo esa vez puede hacerlo. Además cada cliente debe ser servido por un solo vehículo y la suma de las demandas de los clientes visitados por cierto vehículo debe ser menor o igual a la capacidad de dicho vehículo.

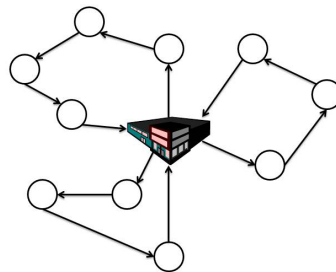


Figura 2.1: Ejemplo del problema de ruteo de vehículos básico

2.2 VARIANTES DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Con el tiempo se han ido agregando restricciones al problema de ruteo de vehículos capacitado y esto da lugar a variantes o extensiones del problema. A continuación en la Figura 2.2 se presentan algunas de las variantes, de las cuales se dará una breve descripción.

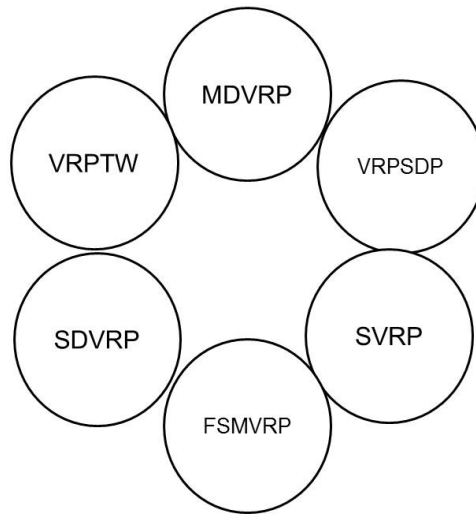


Figura 2.2: Variantes del problema de ruteo de vehículos

- MDVRP (Multi-Depot Vehicle Routing Problem), en esta variante a diferencia del problema básico, los vehículos utilizados para brindar el servicio están distribuidos en más de un depósito [28].
- VRPSDP (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick up and Delivery), es aquel en el que el cliente además de recibir su demanda, este puede enviar productos, en la misma visita realizada por el vehículo. Es decir, a cada cliente se le brindan 2 servicios: entrega y recolección simultáneamente [1].

- SVRP (Stochastic Vehicle Routing Problem), es aquella variante del VRP donde uno o varios componentes del ruteo no son conocidos, ya sea la demanda de los clientes, los clientes o el tiempo de traslado [21].

A continuación se presenta una descripción más detallada de las variantes que tienen mayor incidencia en la problemática abordada.

- VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows):

Es una de las variantes más importantes del problema de ruteo de vehículos. Cada cliente i debe ser servido por el vehículo dentro de un intervalo de tiempo, esto es, el intervalo indica un rango de tiempo en el cual debe de comenzar el servicio al cliente, este intervalo se denota como $[a_i, b_i]$ y es llamado ventana de tiempo. Donde a_i representa el inicio de la ventana de tiempo, el tiempo en el cual se puede dar inicio al servicio del cliente i ; b_i representa el fin de la ventana de tiempo, el tiempo límite en el cual se puede iniciar el servicio al cliente i . Para que el vehículo brinde el servicio al cliente, este debe llegar antes del inicio de la ventana de tiempo o dentro de esta, pero no después ya que no se podrá dar el servicio. Se pueden tener ventanas de tiempo suaves (soft) y ventanas de tiempo duras (hard). Las ventanas de tiempo suaves son aquellas en las que el servicio al cliente puede iniciar después de b_i , y las ventanas de tiempo duras son en las que se debe de cumplir la ventana de tiempo, no se puede dar servicio después de b_i .

En la literatura podemos encontrar trabajos recopilatorios como los de Golden y Assad [24], en el cual se describen implementaciones exitosas, avances en modelos derivados de casos reales y nuevas técnicas para la solución del problema. Desrochers et al. [17], presentan algoritmos de optimización como *branch and bound*, programación dinámica y partición de conjuntos. Bräysy y Gendreau [10] y [11], en [10] presentan un resumen de los trabajos que han sido resueltos bajo metodologías de heurísticas constructivas (construcción de rutas) y algoritmos de búsqueda local. En [11], muestran un compendio de las

metaheurísticas que han sido implementadas para la resolución del problema; búsqueda tabú, algoritmos genéticos y evolutivos por mencionar algunas, son las metaheurísticas que se presentan en dicho trabajo.

Desrochers et al. [16], Cordeau et al. [12] y Azi et al. [4], desarrollaron técnicas exactas para la solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.

En cuanto a metodologías heurísticas y metaheurísticas, Solomon [34] y Tan et al. [37] proponen diversas heurísticas y metaheurísticas, respectivamente. En el caso de heurísticas, describen heurísticas basadas en ahorros, el vecino más cercano, heurísticas de inserción; por el lado de las metaheurísticas, recocido simulado, búsqueda tabú y algoritmos genéticos son las metodologías usadas en estos dos trabajos.

Una extensa cantidad de trabajos en las metodologías antes mencionadas han sido publicados, a continuación se presentan algunos de los más destacados. Rochat y Taillard [31], Taillard et al. [36] y Cordeau et al.

- FSMVRP (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem):

Esta extensión está relacionado con las características de los vehículos. Los vehículos son heterogéneos, es decir, la capacidad y/o costos de los vehículos son diferentes. Esto es más apegado a la realidad ya que en las organizaciones utilizan diferentes tipos de vehículos para realizar la transportación de sus productos.

Esta variante fue introducida a la literatura por Golden et al [23], desarrollaron varias heurísticas eficientes, así como técnicas para generar cotas inferiores y una estimación de la solución óptima. Con el objetivo de determinar el tamaño óptimo de la flota minimizando los costos totales.

Golden et al. [23] desarrolla heurísticas basadas en ahorros para su solución, implementando algoritmos de búsqueda tabú, Semet y Taillard [33], Rochat y Semet [30] y Brandão y Mercer [9]. Gheysens et al. [22], presentan una formula-

ción del problema usando variables binarias de 3 índices, además realizan una heurística basada en heurísticas ya existentes. Yaman [39] propone 6 diferentes formulaciones para el problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea.

- SDVRP (Split Delivery Vehicle Routing Problem):

Aquí, se permite que el cliente sea servido por varios vehículos, esto es importante ya que se da los casos en los que la demanda de algunos clientes excede la capacidad del vehículo y es imposible abastecerlo en un solo viaje.

Dror y Trudeau [18] y [19], fueron los primeros en tratar con esta extensión y su objetivo principal fue demostrar el ahorro sustancial al introducir las entregas divididas.

En cuanto la literatura del SDVRP, Archetti y Speranza desarrollaron un algoritmo de búsqueda tabú para la solución del problema de ruteo de vehículos con entregas divididas, además incluyeron de estudio sobre lo que ha sido implementado para la solución del problema por otros autores, [3] y [2] respectivamente. En [6], Belenguer et al. proponen una cota inferior para este problema.

Pasando a los trabajos en los que abordan más de una de las variantes de nuestro caso de estudio, Dell' Amico et al. [15] y Repoussis y Tarantilis [29], resuelven el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y flota heterogénea. En [15] se desarrolló una heurística constructiva de inserción y un algoritmo metaheurístico mientras que en [29] presentan un enfoque de solución basado en programación de memoria adaptativa. Ho y Haugland [25] plantean un método de solución basado en una búsqueda tabú para la resolución del problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y entregas divididas.

Por último, se presenta la bibliografía que aborda el problema de ruteo con las 3 variantes: ventanas de tiempo, flota heterogénea y entregas divididas. Bajo nuestro conocimiento solo ha sido abordado por Belfiore y Yoshida [7]. En este trabajo realizan un algoritmo de búsqueda dispersa para brindar solución a un caso de estudio de

una empresa brasileña en el cual presentan los resultados con los datos de esta empresa. Para realizar comparación con resultados de la literatura, toman las variantes ventanas de tiempo y entregas divididas para comparar con los resultados del trabajo de [25]. Además por los mismos autores, en [8] presentan la metodología usada en [7], comparando con metodologías que se encuentran en la literatura tomando en cuenta una o dos de las variantes; concluyendo que la metodología propuesta es significativamente mejor que las metodologías con las cuales se comparó su trabajo.

En seguida, la Tabla 2.1 recopila los artículos antes mencionados.

Artículo	VRPTW	FSMVRP	SDVRP	Metodología(s) propuesta(s)
Archetti y Speranza			X	Búsqueda tabú
Azi et al.	X			Algoritmo exacto
Belfiore y Yoshida	X	X	X	Búsqueda dispersa
Berger et al.	X			Algoritmo genético
Brandao y Mercer		X		Búsqueda tabú
Cordeau et al.	X			Búsqueda tabú
Cordeau et al.	X			Algoritmo exacto
Dell'Amico et al.	X	X		"Ruin and Recreate"
Desrochers et al.	X			Algoritmo exacto
Golden et al.		X		Heurísticas basadas en ahorros
Ho y Haugland	X		X	Búsqueda tabú
Jung y Moon	X			Algoritmo genético
Potvin y Bengio	X			Algoritmo genético
Repoussis y Tarantilis	X	X		Búsqueda tabú
Rochat y Semet		X		Búsqueda tabú
Rochat y Taillard	X			Búsqueda tabú
Semet y Taillard		X		Búsqueda tabú

Artículo	VRPTW	FSMVRP	SDVRP	Metodología(s) propuesta(s)
Solomon	X			Heurísticas basadas en ahorros, el vecino más cercano
Taillard et al.	X			Búsqueda tabú
Tan et al	X			Recocido simulado, búsqueda tabú, algoritmo genético
Thangiah	X			Algoritmo genético

Tabla 2.1: Recopilación de artículos

Como se puede observar en la tabla anterior, distintas metodologías han sido propuestas para dar solución al problema de ruteo de vehículos y sus variantes. La búsqueda tabú es la metaheurística más recurrida para la resolución del problema. Esta metaheurística fue desarrollada en el año de 1986 por Fred Glover; tiene como característica distintiva el uso de memoria adaptativa. Tiene como filosofía derivar y explotar una colección de estrategias inteligentes para la resolución del problema planteado basados en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje. En [5], Batista y Glover detallan la metaheurística.

La búsqueda dispersa es otro metaheurístico usado para resolver el VRP, este algoritmo es un método basado en combinar las soluciones que están almacenadas en un conjunto llamado “conjunto de referencia”. Es este conjunto se encuentran las “buenas” soluciones que han sido encontradas durante el proceso de búsqueda. Martí y Laguna [27], explican a profundidad el algoritmo en su trabajo dedicado a dicho procedimiento.

Otro método es el GRASP, es un procedimiento multiarranque o iterativo en donde cada iteración consta de una fase de construcción, en él se construye una solución factible, seguida de una búsqueda local con el fin de encontrar la solución

óptima local. Se puede encontrar más información en el trabajo de Feo y Resende [20].

Heurísticas más “simples” también han sido implementados tales como, heurísticas constructivas, heurísticas basadas en ahorros, búsquedas locales, por mencionar algunas. Otorgándonos un amplio catálogo de metodologías implementadas a lo largo de las décadas que han transcurrido desde que se estudió la primer variante del problema.

Estos han sido unos pocos trabajos que representan la literatura del problema de ruteo de vehículos, sus variantes, y las metodologías que se han abordado. Se puede observar que la bibliografía referente a este problema está en crecimiento, dado a su importante aplicación, numerables trabajos se proponen para la resolución de problemas reales.

CAPÍTULO 3

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En este capítulo se presenta la descripción del problema de estudio, además del modelo matemático correspondiente y conclusiones sobre la experimentación del modelo.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Debido a que la empresa está en crecimiento, se da la necesidad de diseñar un conjunto de rutas óptimas de costo mínimo para satisfacer la entrega de paquetes o mensajería a su conjunto de clientes, teniendo en cuenta ciertas restricciones que la empresa o los clientes presentan. Para llevar a cabo dicha tarea, la empresa cuenta con una flotilla de vehículos heterogéneos, esto es, los vehículos que prestan el servicio son diferentes, esta diferencia radica en la capacidad de los vehículos y por ende en el costo de estos. Los vehículos que manejan son:

- Camionetas
- Camiones de 3/2 tonelada

Para efectuar la operación de carga y descarga el CEDI está dividido en dos secciones; la sección de mensajería y la sección de paquetería. En cada sección existe una clasificación por regiones (si el producto debe ser enviado a otra región) o por

sucursal (si el producto debe ser enviado a una zona asignada a una sucursal ubicada dentro de la región noreste). Así pues, en la descarga, la mensajería es concentrada en un contenedor que posteriormente es trasladado a la sección de mensajería, aquí la mensajería es colocada acorde a las distintas regiones/sucursales de destino. Los paquetes son descargados y almacenados por región/sucursal de destino, y por último son asignados a un vehículo para su distribución.

En la Figura 1.1 se puede apreciar de manera resumida el proceso que se realiza. La zona de Monterrey cubre aproximadamente el 70 % de carga que maneja la región noreste y esta es atendida directamente por el CEDI. Dado el gran volumen de paquetes que se mueve en la zona de Monterrey, es necesario re-clasificar los paquetes por zonas haciendo uso del código postal de destino.



Figura 3.1: Proceso realizado en el depósito

Descrito el proceso de carga y descarga, a continuación se presentan las características del problema:

- Como se mencionó anteriormente, la empresa cuenta con 2 tipos de vehículos diferentes.
- Existe un horario para realizar el servicio de entrega, esto se debe a que la mayoría de los clientes requieren de sus paquetes a cierta hora. Por lo que la empresa debió adoptar esta medida. Y es por esta razón que el problema de estudio solo se enfoca en entregas, ya que los servicios de entrega y recolección se hacen en horarios diferentes, pueden ser tomados como problemas diferentes.
- Dado que por los clientes se adopta la característica antes mencionada, otra que se toma por las necesidades de los clientes es que estos proporcionan a la

empresa un horario dentro del cual se les debe brindar el servicio de entrega. Esta restricción es fuerte, esto es, que se debe de respetar el horario y por tanto, la entrega no se puede realizar antes o después del horario asignado.

- Por último, el cliente es flexible en cuanto a la entrega de su mercancía, permite que se le sea entregada por partes.

Tomando en cuenta las características antes mencionadas, esta problemática cae dentro del problema de ruteo de vehículos con las siguientes características:

- Flotilla heterogénea.
- Ventanas de tiempo.
- Entregas divididas.

La formulación del problema es la siguiente:

Sea $G = (V, A)$ un grafo completo, donde $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ corresponde al conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos. El vértice 0 es el depósito, mientras que el subconjunto de vértices $C = \{1, 2, \dots, n\}$ representa el conjunto de clientes. Cada cliente i tiene asociado un tiempo de servicio s_i , una demanda denotada por q_i , y además una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ en la cual se debe brindar el servicio al cliente i . A su vez cada arista $(i, j) \in A$, donde $i, j \in V$ e $i \neq j$, es asociada con un tiempo de viaje t_{ij} y una distancia de viaje d_{ij} , para fines de este problema, los tiempos y distancias de viajes serán simétricos, es decir, $t_{ij}=t_{ji}$ y $d_{ij}=d_{ji}$.

En el caso del depósito, los parámetros antes mencionados se consideran de la siguiente forma: la ventana de tiempo asociada se denota como $[a_0, b_0]$ donde a_0 representa la salida más temprana del depósito y b_0 la llegada más tardía a él. Dado que al depósito no se le está brindando servicio, entonces $s_0 = 0$ y además no tiene demanda a la cual satisfacer, por lo tanto $q_0 = 0$.

Cada cliente i es servido por una flotilla de vehículos heterogénea, se tiene un conjunto $K = \{1, 2, \dots, m\}$ de diferentes tipos de vehículos. Cada vehículo $k \in K$ tiene una capacidad Q_k , un costo fijo f_k y un costo variable por unidad de distancia v_k . El costo de cada vehículo de tipo $k \in K$ por recorrer la arista (i, j) se denota por c_{ijk} y está dado al multiplicar la distancia d_{ij} y el costo variable v_k .

Se tiene como objetivo minimizar el costo total de operación, esto es, minimizar la suma de los costos fijos de los vehículos utilizados y el costo variable por unidad de distancia. Además de determinar el tipo de vehículo que servirá a los clientes, se toma en cuenta lo siguiente:

- Toda ruta debe iniciar y terminar en el depósito.
- La demanda de los clientes puede ser satisfecha en uno o varios viajes.
- Se debe brindar servicio a cada cliente dentro de su ventana de tiempo.
- La suma de las demandas de los clientes en una ruta no debe exceder la capacidad del vehículo asignado a esa ruta.

3.2 PARÁMETROS

Los parámetros de la formulación son:

- n : número de clientes.
- $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, donde el vértice 0 denota el depósito y el subconjunto $C = \{1, 2, \dots, n\} \subset V$, representa el conjunto de clientes que deben ser servidos.
- s_i : tiempo de servicio del cliente i .
- a_i : límite inferior de la ventana de tiempo para brindar el servicio al cliente i .

- b_i : límite superior de la ventana de tiempo para brindar el servicio al cliente i .
- a_0 : límite inferior de la ventana de tiempo del depósito.
- b_0 : límite superior de la ventana de tiempo del depósito.
- q_i : demanda del cliente i .
- t_{ij} : tiempo de viaje para recorrer el arista (i, j) .
- d_{ij} : distancia de viaje del cliente i al cliente j .
- Q_k : capacidad del vehículo de tipo k .
- f_k : costo fijo del vehículo de tipo k .
- v_k : costo variable por unidad de distancia.
- n_k : número de vehículos de tipo k .
- c_{ijk} : costo de atravesar el arista (i, j) .

3.3 VARIABLES DE DECISIÓN

Las variables de decisión del modelo a presentar son las siguientes:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } j \text{ es servido inmediatamente después del} \\ & \text{cliente } i \text{ por el vehículo de tipo } k \\ 0 & \text{de otro modo.} \end{cases}$$

w_i^k tiempo en el que inicia el servicio del cliente i por un vehículo de tipo k .

y_i^k cantidad de demanda del cliente i entregada por el vehículo de tipo k .

3.4 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático propuesto para la problemática está basado en los modelos presentados por Ho y Haugland [25], Dror y Trudeau [18], Golden et al. [23] y Archetti y Speranza[2]. A continuación se presenta el modelo propuesto con la descripción de cada una de las restricciones que lo componen.

La función objetivo consiste en la minimización del costo total de operación.

$$\min \sum_{k=1}^m f_k \sum_{j=1}^n x_{0j}^k + \sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \sum_{k=1}^m c_{ij}^k x_{ij}^k$$

Restricciones:

Cada cliente puede ser visitado al menos una vez, permitiendo así las entregas divididas.

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \geq 1; \quad j \in V; \quad (3.1)$$

Restricción de conservación de flujo. *El número de rutas que salen del depósito debe de ser igual al número de rutas que llegan al depósito.*

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq p}}^n x_{ip}^k - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq p}}^n x_{pj}^k = 0; \quad p \in V; \quad k \in K \quad (3.2)$$

Impone el número máximo de vehículos de tipo k que están disponibles en el depósito.

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k \leq n_k; \quad k \in K \quad (3.3)$$

Garantiza que la demanda de cada cliente será satisfecha en su totalidad.

$$\sum_{k=1}^m y_i^k = q_i; \quad i \in V \setminus \{0\} \quad (3.4)$$

Asegura que la capacidad del vehículo no sea excedida.

$$\sum_{i=1}^n y_i^k \leq Q_k; \quad k \in K \quad (3.5)$$

Esta restricción garantiza que la demanda de cada cliente es satisfecha solo si un vehículo determinado pasa por el lugar.

$$y_i^k \leq q_i \sum_{j=0}^n x_{ij}^k; \quad i \in V \setminus \{0\}; \quad k \in K \quad (3.6)$$

Restricción que establece un tiempo mínimo para el inicio del servicio al cliente j en una ruta determinada y también garantiza que no habrá subtours.

$$w_i^k + s_i + t_{ij} - (b_i + t_{ij} - a_i)(1 - x_{ij}^k) \leq w_j^k; \quad i \in V \setminus \{0\}; \quad j \in V \setminus \{0\}; \quad k \in K \quad (3.7)$$

Asegura que cada vehículo regrese al depósito antes del fin de la ventana de tiempo del depósito.

$$w_i^k + s_i + t_{i0} - (b_i + t_{i0} - a_0)(1 - x_{ij}^k) \leq b_0; \quad i \in V \setminus \{0\}; \quad j \in V \setminus \{0\}; \quad k \in K \quad (3.8)$$

La siguiente restricción garantiza que todos los clientes son servidos dentro de su ventana de tiempo.

$$a_i \leq w_i^k \leq b_i; \quad i \in V \setminus \{0\}; \quad k \in K \quad (3.9)$$

Naturaleza de las variables.

$$y_i^k \geq 0; \quad i \in V \setminus \{0\}; \quad k \in K \quad (3.10)$$

$$w_i^k \geq 0; \quad i \in V \setminus \{0\}; \quad k \in K \quad (3.11)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}; \quad i \in V \setminus \{0\}; \quad k \in K \quad (3.12)$$

El modelo queda de la siguiente manera:

Minimizar

$$\sum_{k=1}^m f_k \sum_{j=1}^n x_{0j}^k + \sum_{i=0}^n \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \sum_{k=1}^m c_{ij}^k x_{ij}^k$$

Sujeto a:

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \geq 1 \quad \forall j \in V$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq p}}^n x_{ip}^k - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq p}}^n x_{pj}^k = 0 \quad \forall p \in V; k \in K$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k \leq n_k \quad \forall k \in K$$

$$\sum_{k=1}^m y_i^k = q_i \quad \forall i \in V \setminus \{0\}$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^k \leq Q_k \quad \forall k \in K$$

$$y_i^k \leq q_i \sum_{j=0}^n x_{ij}^k \quad \forall i \in V \setminus \{0\}; k \in K$$

$$w_i^k + s_i + t_{ij} - (b_i + t_{ij} - a_i)(1 - x_{ij}^k) \leq w_j^k \quad \forall i \in V \setminus \{0\}; j \in V \setminus \{0\}; k \in K$$

$$w_i^k + s_i + t_{i0} - (b_i + t_{i0} - a_0)(1 - x_{ij}^k) \leq b_0 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}; j \in V \setminus \{0\}; k \in K$$

$$a_i \leq w_i^k \leq b_i \quad \forall i \in V \setminus \{0\}; k \in K$$

$$y_i^k \geq 0 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}; k \in K$$

$$b_i^k \geq 0 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}; k \in K$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \setminus \{0\}; k \in K$$

3.5 EXPERIMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y CONCLUSIONES

En esta sección se presentan algunas conclusiones con respecto a la experimentación del modelo, las cuales, justifican el uso de heurísticas como metodología de solución para el problema de estudio.

Para realizar la experimentación necesaria, se tomaron las instancias de Liu y Shen [26] quienes trabajaron con un FSMVRPTW. Estas instancias están basadas en las instancias de Solomon [35]. Los cambios o agregados en las instancias de Liu y Shen consisten en que a cada grupo de instancias se le agregan costos diferentes, además se trabaja con diferentes tipos de vehículos, convirtiendo los vehículos de las instancias de Salomón de homogéneos a heterogéneos, donde a cada tipo de vehículo se le asocia una capacidad diferente.

Las instancias de Solomon consisten en 3 grupos llamados C, R y RC. En cada grupo hay 2 subgrupos, siendo C1, C2, R1, R2, RC1 Y RC2, los conjuntos de instancias totales. En el conjunto R1 y R2, los datos geográficos fueron generados aleatoriamente, en C1 y C2, los datos fueron agrupados y en los conjuntos RC1 y RC2 son una mezcla de datos aleatorios y agrupados. En las Figuras 3.1 - 3.6, se muestran gráficas de la ubicación de los clientes en los grupos de instancias descritos.

Con respecto a las ventanas de tiempo, los grupos R1, C1 y RC1, tienen un horizonte de programación pequeño; mientras que R2, C2 y RC2, su horizonte de programación es largo. Las coordenadas de los clientes son idénticas para todas las instancias dentro de un tipo, difieren únicamente con respecto a la duración de las ventanas de tiempo de los clientes. Una última característica es que el tiempo de viaje se considera igual que su distancia correspondiente, siendo esta, la distancia euclidiana.

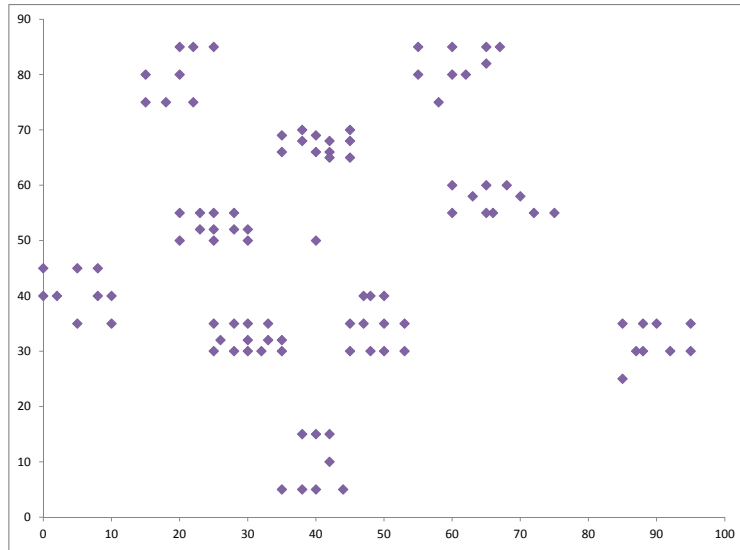


Figura 3.2: Ubicación de clientes en C1

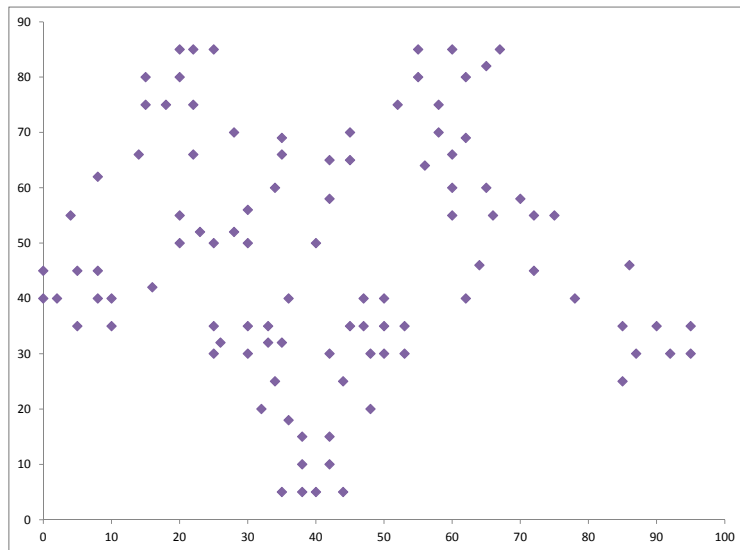


Figura 3.3: Ubicación de clientes en C2

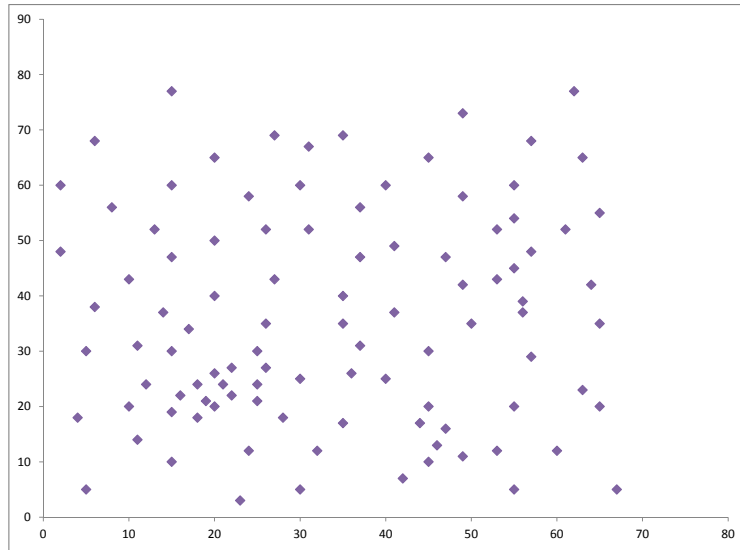


Figura 3.4: Ubicación de clientes en R1

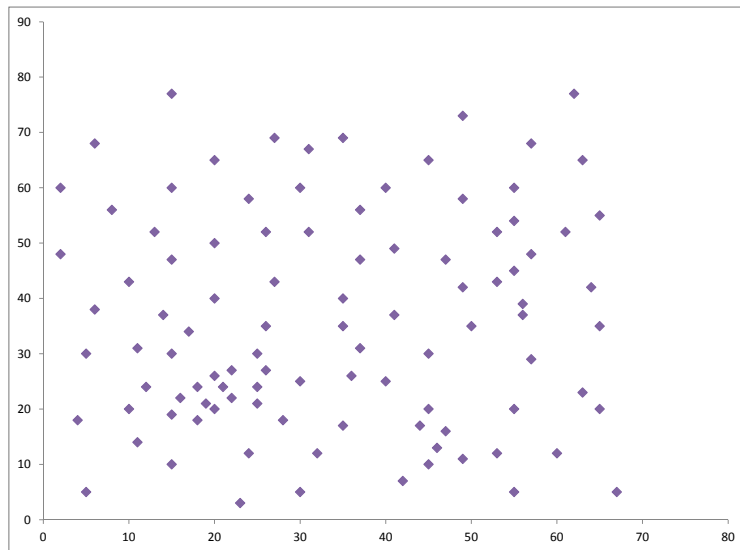


Figura 3.5: Ubicación de clientes en R2

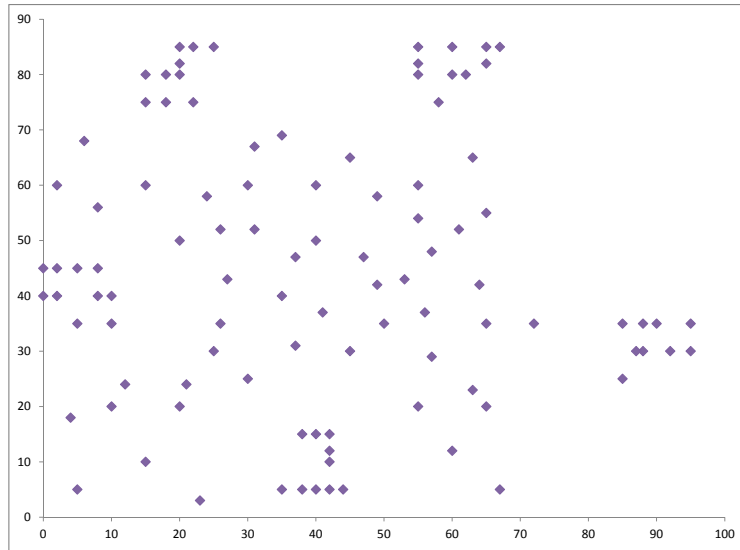


Figura 3.6: Ubicación de clientes en RC1

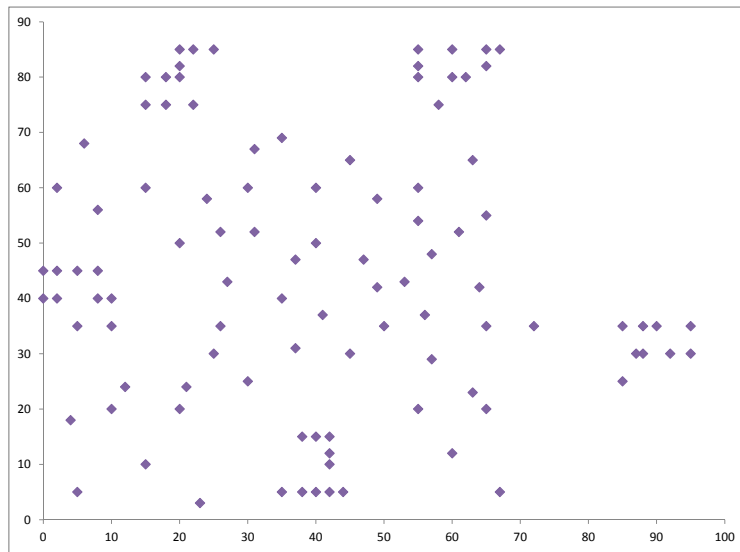


Figura 3.7: Ubicación de clientes en RC2

La experimentación se llevó a cabo utilizando el software OPL Studio/CPLEX 12.5, en un procesador Intel Core i3 y sistema operativo Windows 7. Se establecieron dos criterios de parada: memoria disponible (128 mb) y tiempo de ejecución (60 minutos). Inicialmente se trabajó con un tamaño de instancia de 10 y 50 clientes. Se obtuvieron resultados para las instancias de 10 clientes, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 3.1 la cual muestra el GAP y el tiempo de ejecución de cada una de las instancias que conforman los grupos. Note que en algunas instancias no aparece dato, esto quiere decir que uno de los criterios de parada se activó al estar ejecutando la instancia.

Para las instancias de 50 clientes en ninguna se obtuvo resultado dado que la memoria requerida para la resolución de estas instancias sobrepasa la memoria disponible especificada en el criterio de parada. Posteriormente, dada la experiencia con 50 clientes, se decidió probar instancias con 25 clientes. Como resultado se obtuvo que son pocas las instancias en las que se tiene solución, ya que en el tiempo disponible de ejecución no se obtuvo solución.

Por tanto, se concluye que el alcance del modelo es menor de 25 clientes ya que como se mencionó anteriormente y como se mostrará en las gráficas siguientes, el número de instancias con soluciones encontradas es muy pequeño.

En la Figura 3.7, se muestra una gráfica con los porcentajes que representan a las instancias de tamaño de 10 clientes de las cuales se encontró o no se encontró solución. Así mismo, en la Figura 3.8, se presentan los porcentajes de las instancias de 25 clientes.

Instancia	GAP(%)	Tiempo(seg)	Instancia	GAP(%)	Tiempo(seg)
C101	0	0.17	R201	0	0.16
C102	.	.	R202	8.14	104.61
C103	.	.	R203	8.14	101.98
C104	.	.	R204	.	.
C105	0	0.27	R205	0	0.52
C106	0	0.17	R206	.	.
C107	0	0.30	R207	.	.
C108	33.82	0.8	R208	.	.
C109	2	4.62	R209	77.91	1.22
C201	0	0.14	R210	12.73	430.08
C202	8.99	24.95	R211	.	.
C203	8.99	23.1	RC101	1.95	1.15
C204	7.54	666.89	RC102	.	.
C205	11.74	0.45	RC103	.	.
C206	1.16	0.86	RC104	.	.
C207	0	0.41	RC105	1.88	1307.30
C208	1.56	0.42	RC106	8.44	21.51
R101	4.59	0.69	RC107	1.49	571.88
R102	8.23	9.91	RC108	.	.
R103	8.23	10.56	RC201	8.55	0.73
R104	6.64	56.46	RC202	.	.
R105	0	0.48	RC203	.	.
R106	7.29	16.36	RC204	.	.
R107	7.29	19.48	RC205	10.49	42.53
R108	6.74	32.26	RC206	5.33	7.89
R109	14.85	0.48	RC207	7.06	62.62
R110	8.55	2.15	RC208	.	.
R111	10.6	3.00			
R112	5.26	32.95			

Tabla 3.1: GAP y Tiempo de ejecución de las instancias de 10 clientes

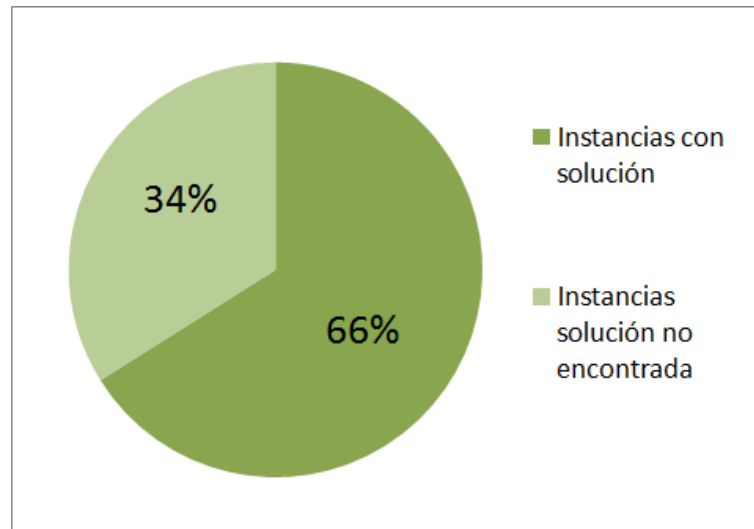


Figura 3.8: Porcentaje de instancias de 10 clientes con solución óptima o factible encontrada y solución no encontrada

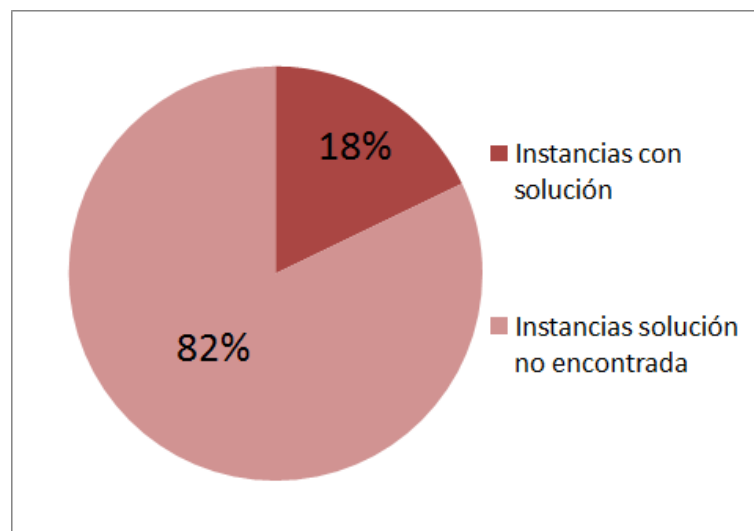


Figura 3.9: Porcentaje de instancias de 25 clientes con solución óptima o factible encontrada y solución no encontrada

Los grupos de instancias RC1 y RC2 son los que presentan mayor número de instancias con solución no encontrada en las instancias de 10 clientes, mientras que en las instancias de 25 clientes en los 6 grupos se observa un gran número de instancias sin solución. en la Figura 3.9 y en la Figura 3.10 puede apreciarse la diferencia entre

el las instancias con solución y las de no solución encontrada dentro de los criterios de parada.

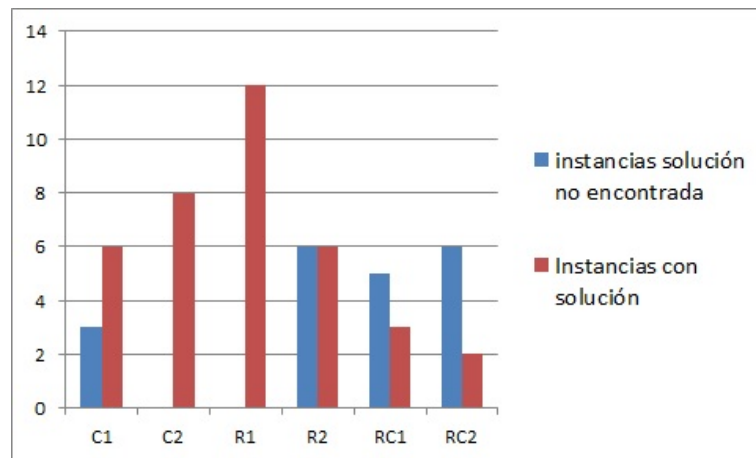


Figura 3.10: Diferencias en número de instancias con solución y sin solución para 10 clientes.

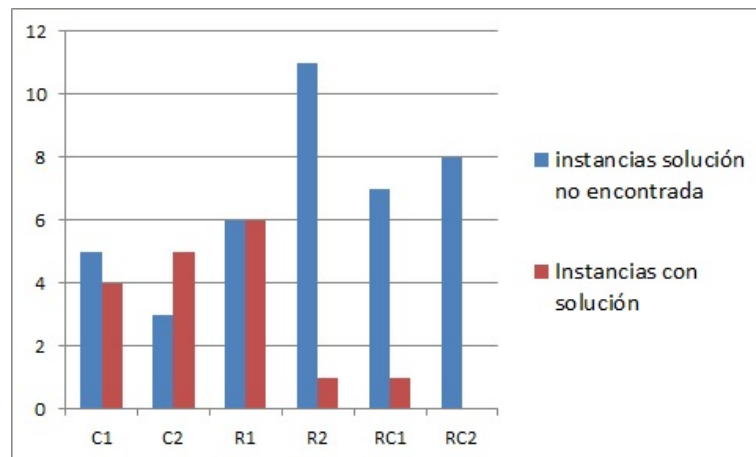


Figura 3.11: Diferencias en número de instancias con solución y sin solución para 25 clientes.

En la Tabla 3.2, se describe el número de restricciones y el número de variables asociadas a cada grupo de instancias, los valores cambian ya que para cada grupo de instancia, el número de tipos de vehículos varía entre 3 y 6 tipos. El aumento de restricciones y de variables en cada uno de los grupos es de aproximadamente 500% en ambos casos, esto nos indica (como ya lo sabemos), que el número de

restricciones y variables en cada instancia crece exponencialmente al aumentar el número de clientes a servir.

Grupo	10 clientes		25 clientes	
	Núm. Restricciones	Núm. Variables	Núm. Restricciones	Núm. Variables
C1	449	424	2234	2179
C2	592	565	2962	2905
R1	735	706	3690	3631
R2	592	565	2962	2905
RC1	592	565	2962	2905
RC2	878	847	4418	4357

Tabla 3.2: Número de restricciones y variables de cada grupo de instancias

Dado el tiempo y esfuerzo computacional que el algoritmo exacto necesita para la resolución del modelo matemático presentado, además de tomar en cuenta la complejidad del problema (NP-Hard [25]) lo que implica que a mayor tamaño de las instancias el tiempo computacional necesario para obtener una solución óptima es muy grande, o bien en muchos casos la memoria computacional se termina por lo que no se encuentra solución óptima

Otro punto importante es la frecuencia con la que se tiene que resolver el problema, se tiene planeado ejecutarlo diariamente para realizar el servicio de entregas, por este motivo es necesario que las soluciones se obtengan rápidamente. Estas dos razones son las que principalmente nos han llevado a hacer uso de métodos heurísticos. A continuación se describe el método de solución propuesto.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

En esta sección se propone la metodología para dar solución a la problemática de estudio. Se busca que la metodología propuesta obtenga una solución rápida y eficiente, misma que permita crear una ventaja competitiva para la organización para generar las conclusiones de este trabajo de tesis.

El algoritmo propuesto es una heurística constructiva basada en el vecino más cercano. El vecino más cercano es uno de los heurísticos más sencillos, trata de construir un ciclo Hamiltoniano de bajo costo basándose en el vértice cercano a uno dado. Este algoritmo fue propuesto por Rosenkrantz, Stearns y Lewis en el año de 1977 [32].

El algoritmo del vecino más cercano en su versión estándar es el siguiente:

Algoritmo del Vecino más cercano

Inicialización

Seleccionar un vértice j al azar.

Hacer $t = j$ y $W = V \setminus \{j\}$.

Mientras ($W \neq \emptyset$)

Tomar $j \in W \mid c_{tj} = \min\{c_{ti} \mid i \in W\}$

Conectar t a j

Hacer $W = W \setminus \{j\}$ y $t = j$.

Una de las desventajas que presenta este algoritmo es que al final del proceso probablemente quedarán vértices cuya conexión obligará a introducir aristas de costo elevado, a esto se le llama miopía del procedimiento, ya que al estar eligiendo en cada iteración a la mejor opción disponible, hace que en iteraciones posteriores realice malas elecciones. Es por esta razón que se ha modificado el algoritmo estándar con el fin de tratar de evitar o reducir la miopía del procedimiento.

Por ejemplo, si nuestro objetivo principal fuera la minimización de la distancia, en la Figura 4.1 se muestra una solución del problema usando la heurística del vecino más cercano. En cambio, en la Figura 4.2 se presenta lo que pretendemos hacer con nuestro algoritmo, tratar de evitar que la elección del cliente siempre sea el más cercano, permitiendo que pueda alejarse y así reducir (o tratar de reducir) la miopía del procedimiento. Se tiene en cuenta que esta miopía no se erradicará al 100 %.

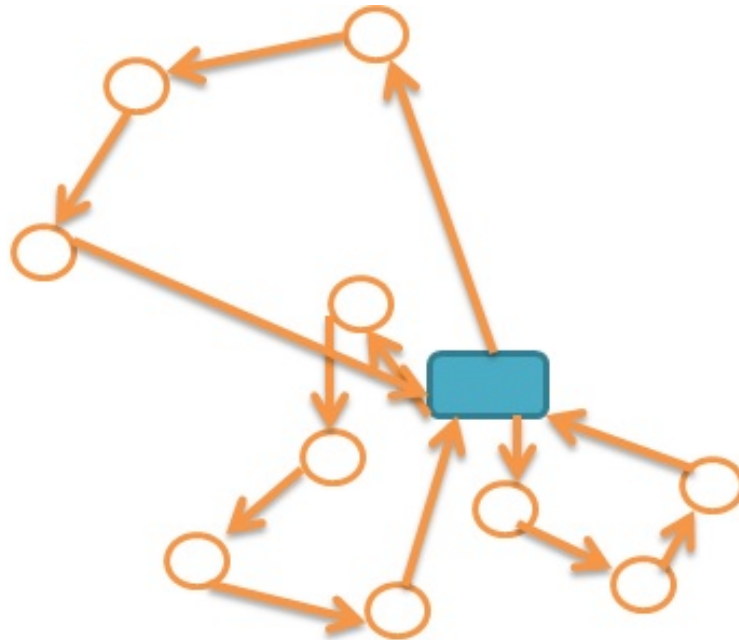


Figura 4.1: Algoritmo el vecino más cercano

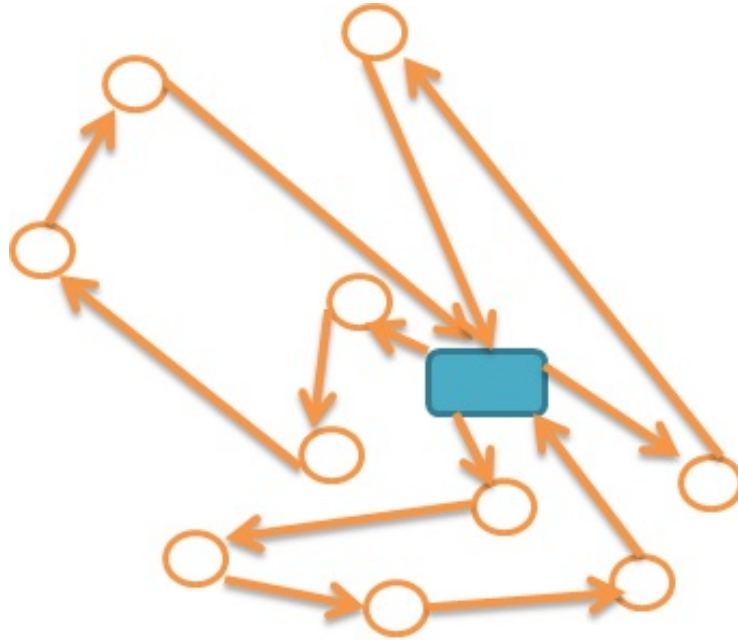


Figura 4.2: Pretención de nuestro algoritmo

Para nuestro propósito, el heurístico constructivo se convierte en un modo multiarranque, solo que se omite la fase de mejora. El cual, para referencias futuras llamamos Constructivo Aleatorizado (CA). El algoritmo se repite un número máximo de iteraciones que actúa como criterio de parada del algoritmo, en cada una de las cuales se construye una solución factible, y al final reporta la mejor solución encontrada.

Ya que el algoritmo está basado en la heurística del vecino más cercano, tomamos este enfoque pero con respecto a la ventana de tiempo del cliente a agregar a la ruta y la distancia entre este y el último cliente en ruta. Así pues, mientras haya clientes que añadir a la ruta y la carga de la ruta no exceda la capacidad del vehículo con mayor capacidad, se calcula para cada cliente candidato la siguiente función:

$$f(i, j) = (d_{ij})(a_j - l_i)^2 \quad (4.1)$$

Dónde:

- * d_{ij} representa la distancia entre el último cliente en la ruta y el cliente evaluado.
- * a_j es el inicio de la ventana de tiempo del cliente evaluado.
- * l_i es la salida del último cliente en la ruta.

Calculada la función en cada uno de los clientes, se procede a ordenar ascendentemente los valores obtenidos con la función. La elección del cliente a añadir en la ruta se hace aleatoriamente, para conservar el enfoque del vecino más cercano, el cliente con el valor de la función más pequeño se le atribuye la probabilidad más alta de ser elegido para ser agregado. La probabilidad de los clientes restantes, entre más alto sea el valor de la función, menor es su probabilidad.

Teniendo el candidato a añadir en la ruta sigue verificar si es posible insertarlo, es decir, hay que checar si su inserción es factible. Primero, se verifica que el arribo a la ubicación del cliente sea dentro de su ventana de tiempo, si esto se cumple, se pueden presentar dos casos, los cuales son:

- Caso 1: La demanda del cliente puede ser satisfecha en su totalidad.
- Caso 2: Solo se puede satisfacer una parte de la demanda del cliente.

Si se presenta el Caso 1, el cliente se incluye en la ruta. Si se presenta el Caso 2, el cliente es añadido en la ruta pero sigue siendo candidato a ser añadido con la diferencia que ahora su demanda será la porción de demanda que no pudo ser satisfecha. Este procedimiento se realiza hasta que todos los clientes o toda la demanda de los clientes estén asignados en una ruta. En el diagrama de la Figura 4.3 se puede observar el procedimiento descrito.

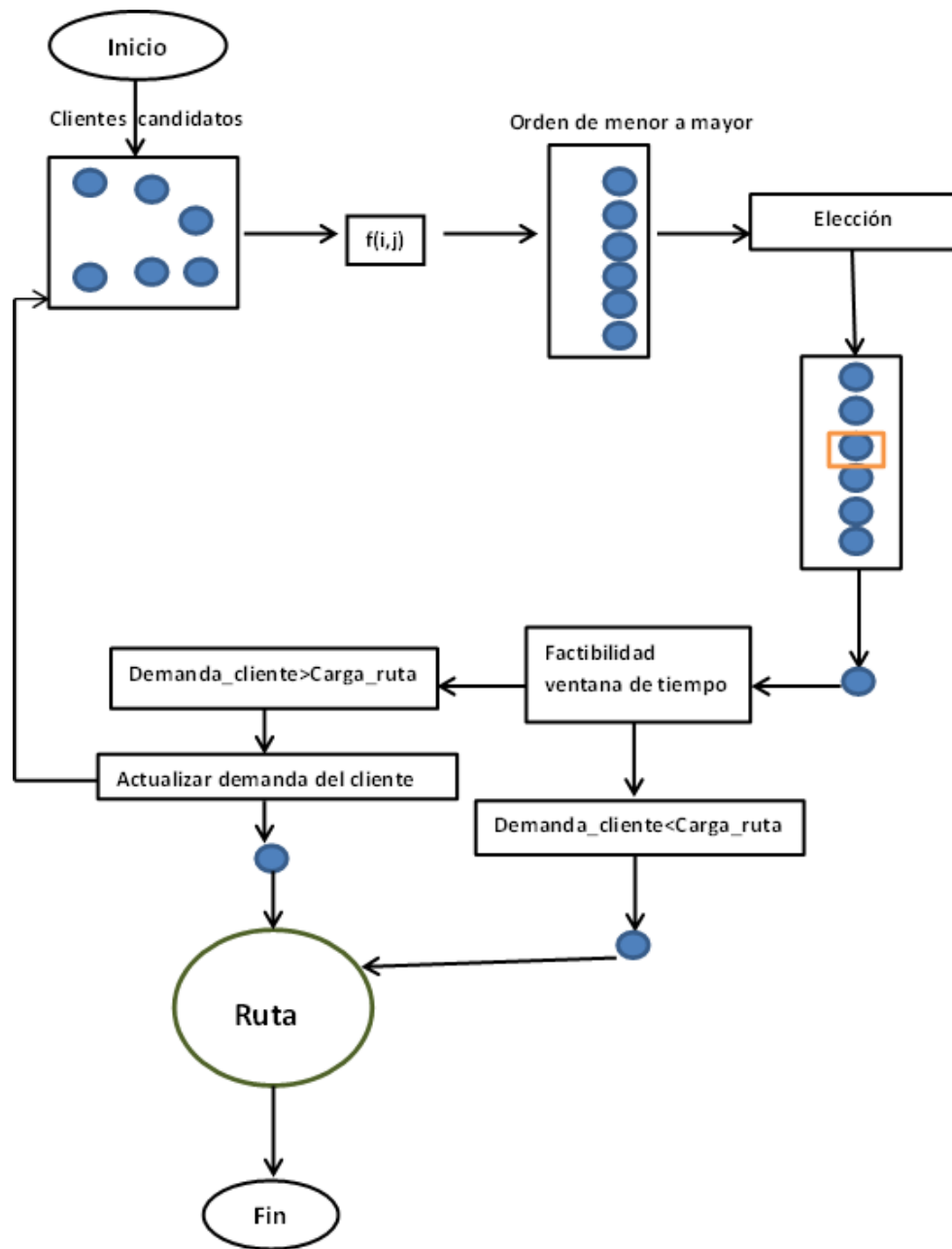


Figura 4.3: Esquema de una iteración del constructivo

Al crear la solución con el procedimiento descrito, se procede a calcular la distancia, tiempo total en ruta y el número de vehículos usados en la solución creada dando el paso a hacer la comparación con la mejor solución actual, si la solución creada en la iteración actual mejora a la solución almacenada, esta pasa a ser la nueva mejor solución.

Tal como se mencionó anteriormente, el procedimiento antes descrito se realiza un número de iteraciones establecidas, el cual es nuestro criterio de parada. Al terminar estas iteraciones se procede a calcular el costo total de la mejor solución encontrada por el algoritmo. A continuación se presenta el pseudocódigo del algoritmo propuesto.

Constructivo

Inicialización

Maxiter := número de iteraciones

Iteractual \leftarrow 0

Mejorsolucion $\leftarrow \phi$

while(Iteractual \leq Maxiter)

 Seleccionar al depósito como cliente de partida.

 Hacer $i = \text{depósito}$ y $W = V \setminus \{\text{depósito}\}$.

 while($W \neq \phi$ and $\text{carga} \leq \text{maxcarga}$)

 for j in 0 to len(W)

$f(i,j) = (\text{distancia}(i,j))(a_j - l_i)^2$

 funcion $\leftarrow f(i,j)$

 sorted(funcion)

$t = \text{random}()$

 if($\text{Traveltime}_t \leq b_t$)

$\text{caprest} = \text{maxcarga} - \text{carga}$

$\text{demruta} = \min(\text{caprest}, \text{demcliente})$

 if($\text{demruta} > 0$)

 Conectar t a j

 if($\text{demcliente} > \text{demruta}$)

$\text{demanda} = \text{demcliente} - \text{demruta}$

 Hacer $W = W \setminus \{t\}$ y hacer $j = t$

 if($\text{demanda} > 0$)

$\text{demand}_j \leftarrow \text{demanda}$

 else

 Pasar a otro cliente

 Iteractual +=1

 Mejorsolucion $\leftarrow \text{compararsoluciones}()$

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Para saber si la metodología propuesta tiene buen desempeño, es necesario realizar la experimentación correspondiente. Cabe señalar que el método a implementar al ser un algoritmo heurístico no garantiza la optimalidad en las soluciones encontradas, pero pueden ser de gran utilidad para el tomador de decisiones. Al igual que en la experimentación del modelo matemático, la implementación del método descrito anteriormente será probado con las instancias de Liu y Shen.

La implementación fue llevada a cabo en el lenguaje de programación Python 2.7 en un procesador Intel Core i3 bajo el sistema operativo Windows 7.

5.1 INSTANCIAS

Se implementaron 3 tamaños de instancias, chicas, medianas y grandes. Las instancias chicas son de 25 clientes, las instancias medianas constan de 50 clientes, mientras que las instancias grandes son de 100 clientes. Para cada uno de los 6 grupos de instancias, el número de tipo de vehículos fue variando entre 3 y 6 tipos, la Tabla 5.1 muestra el número de tipo de vehículos, la capacidad y el costo fijo para cada grupo.

Instancia	Tipo vehículo	Capacidad	Costo fijo
C1	1	100	30
	2	200	80
	3	300	135
C2	1	400	100
	2	500	140
	3	600	200
	4	700	270
R1	1	30	5
	2	50	8
	3	80	14
	4	120	25
	5	200	50
R2	1	300	450
	2	400	700
	3	600	1200
	4	1000	2500
RC1	1	40	6
	2	80	15
	3	150	300
	4	200	45
RC2	1	100	15
	2	200	35
	3	300	55
	4	400	80
	6	500	110
	6	1000	250

Tabla 5.1: Características de las instancias

Además de las características presentadas en la tabla anterior, se agregaron parámetros utilizados en el programa computacional elaborado. Dado que la función objetivo de costo total de operación se compone de un costo fijo y un costo variable y las instancias de Liu y Shen solo proporcionan el costo fijo, se definieron los costos variables para cada tipo de vehículo, el cual fue constante en los 6 grupos de instancias. Además se indica el número de iteraciones a realizar por el algoritmo, en el caso de las instancias chicas se estableció en 15,000 iteraciones, en las instancias medianas fue de 10,000 iteraciones y en las instancias grandes fueron 5,000 iteraciones.

5.2 EXPERIMENTACIÓN

Las 56 instancias de Solomon fueron probadas para cada uno de los tamaños de instancias, dando un total de 168 instancias. A continuación se presentan gráficas del tiempo computacional recorrido por las instancias para con ellas analizar el impacto en el tiempo con el aumento del número de clientes.

En las Figuras 5.1 - 5.6, se puede observar el incremento del tiempo en segundos, para los grupos C1, R1, R2 y RC2 el tiempo requerido para las instancias de 50 clientes es aproximadamente 3 veces el tiempo de las instancias de 25 clientes, en el grupo C2 el tiempo de instancias incrementa en aproximadamente 2.5 veces, en cuanto al grupo RC1 casi requiere 4 veces más del tiempo computacional.

También se puede observar que el tiempo en las instancias de 25 clientes tiende a ser constante dentro del grupo correspondiente, al contrario de las instancias de 50 clientes en las que se puede observar que hay cambios que pueden considerarse bruscos. Para el aumento a 100 clientes, el tiempo aumenta considerablemente, dejando una gran diferencia entre los tiempos de las instancias de 25 clientes.

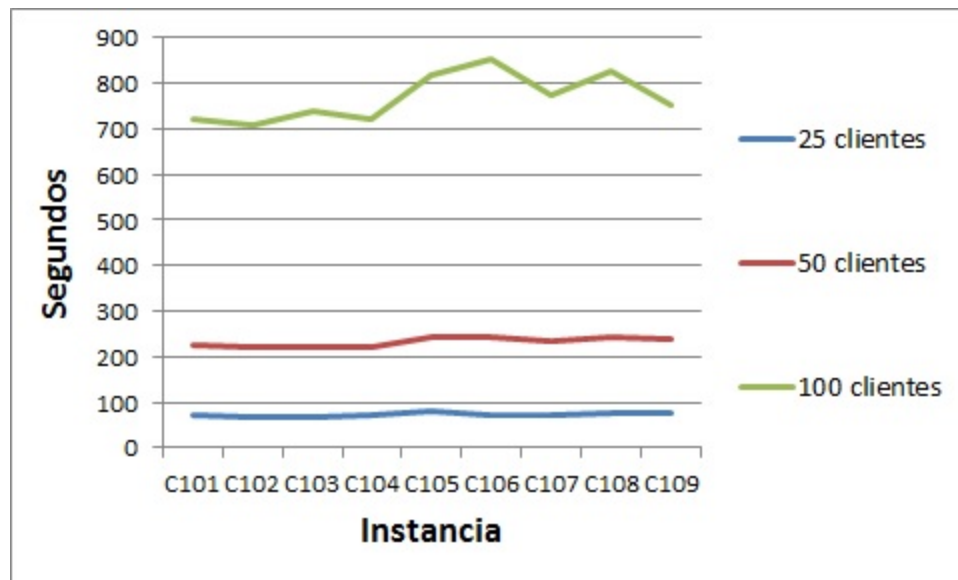


Figura 5.1: Tiempos de ejecución de las instancias del grupo C1.

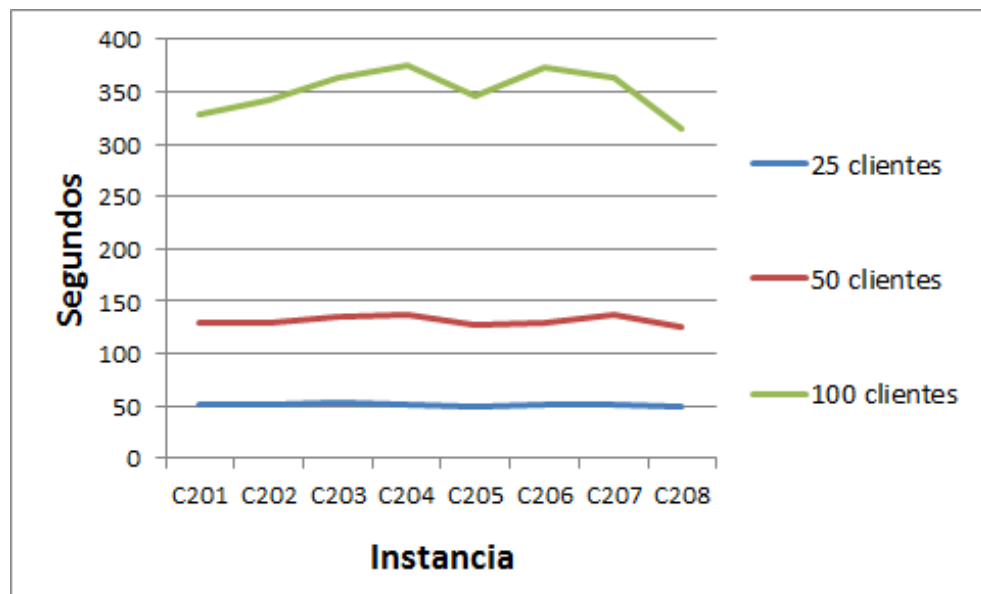


Figura 5.2: Tiempos de ejecución de las instancias del grupo C2.

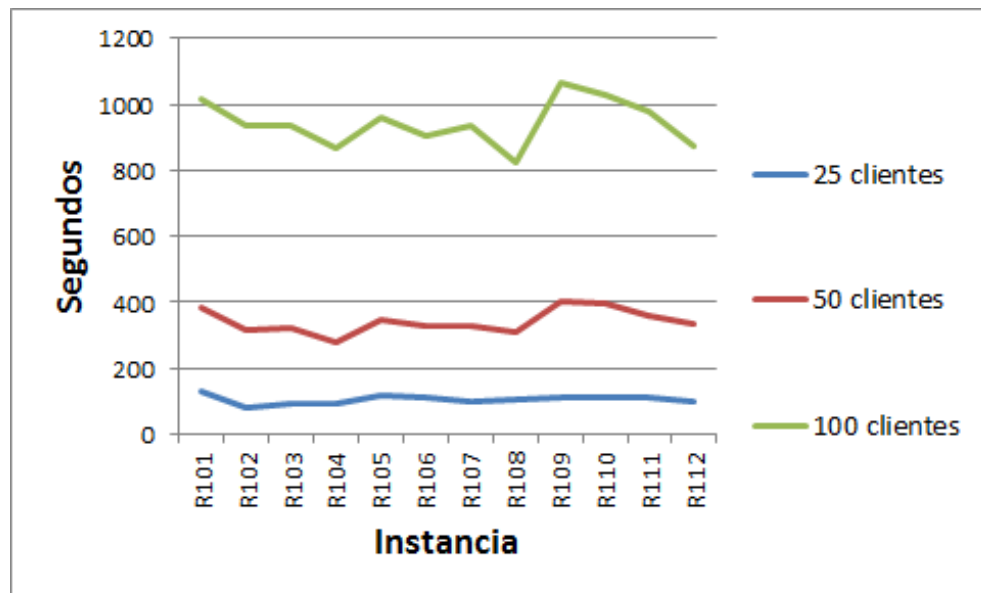


Figura 5.3: Tiempos de ejecución de las instancias del grupo R1.

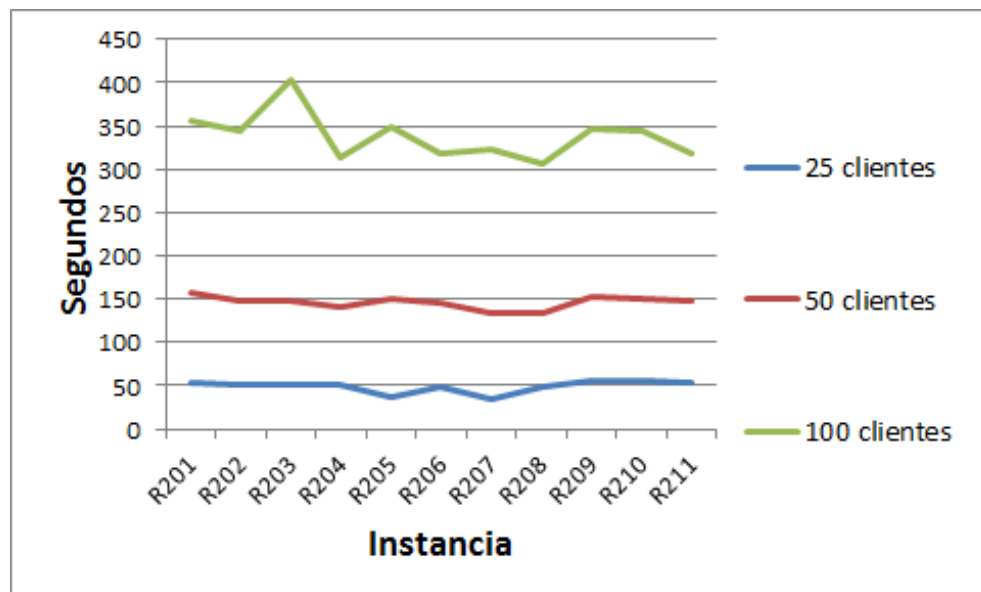


Figura 5.4: Tiempos de ejecución de las instancias del grupo R2.

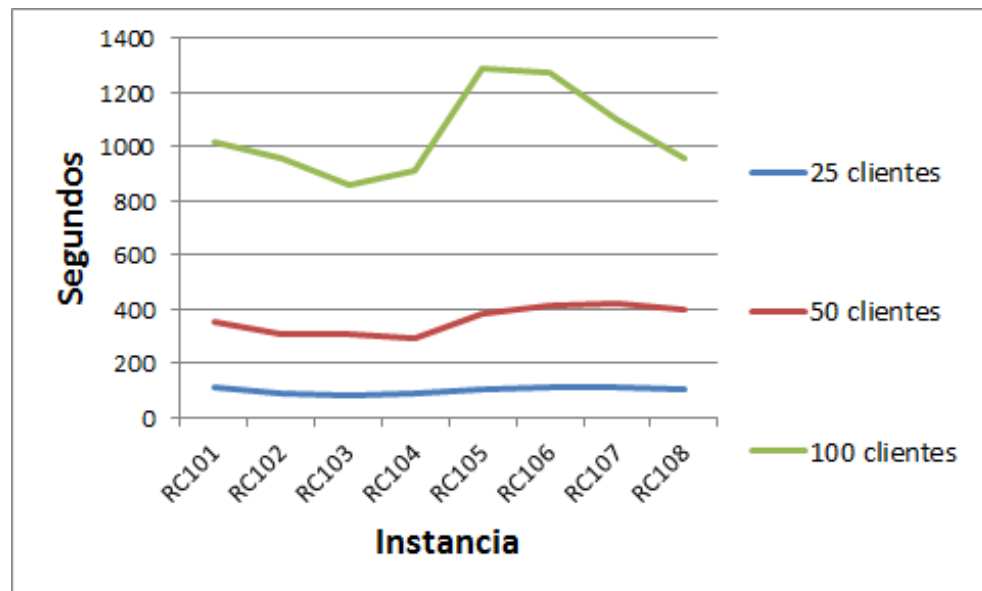


Figura 5.5: Tiempos de ejecución de las instancias del grupo RC1.

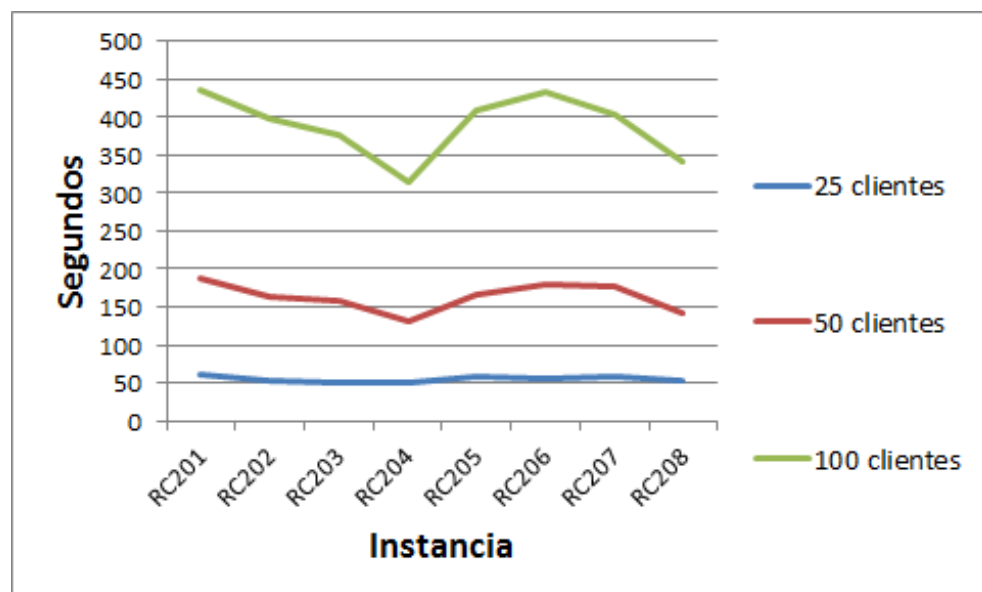


Figura 5.6: Tiempos de ejecución de las instancias del grupo RC2.

Para evaluar la eficiencia de un algoritmo, uno de los métodos es recurrir a la comparación de los valores obtenidos del algoritmo y los valores óptimos encontrados; pero en nuestro caso, como nuestro problema no ha sido estudiado ampliamente en literatura no disponemos de dichos valores. Es por eso que se implementó el algoritmo realizado pero “desactivando” la aleatoriedad y así tener un algoritmo del vecino más cercano. El cual llamamos Constructivo sin Aleatorización (CSA).

Para realizar la comparación se eligieron 36 instancias dentro de las 168 probadas anteriormente las cuales se examinaron con el algoritmo sin aleatoriedad y se estableció una diferencia entre los valores obtenidos con los dos algoritmos, mediante:

$$Dev = \left(\frac{X_{csa} - X_{ca}}{X_{ca}} \right) (100 \%)$$

Dónde:

- * X_{csa} : es el valor obtenido del algoritmo desactivando la aleatoriedad.
- * X_{ca} : es el valor obtenido mediante el algoritmo descrito en el capítulo anterior.

En las siguientes tres tablas, Tablas 5.2 - 5.4, se muestran las soluciones obtenidas con la metodología CA para los 3 tamaños de instancias, la Tabla 5.2 muestra las soluciones para las instancias chicas, la Tabla 5.3 presenta las soluciones de las instancias medianas y en la Tabla 5.4 se muestran las soluciones para las instancias grandes. Se presenta el valor objetivo, el número de vehículos empleados, la distancia total recorrida y el tiempo de ejecución.

Instancia	Costo Total	Número Vehículos	Distancia	Segundos	Instancia	Costo Total	Número Vehículos	Distancia	Segundos
C101	476.3145	3	196.866	73	R201	1202.799	2	605.598	53
C102	605.476	3	325.94	67	R202	1203.959	2	6607.918	50
C103	417.4763	3	263.097	67	R203	1166.744	2	533.488	51
C104	517.5795	3	254.081	70	R204	1128.892	2	457.784	52
C105	449.421	4	289.465	80	R205	1197.4715	2	594.943	38
C106	490.719	3	226.837	73	R206	1308.085	1	608.085	48
C107	465.175	4	296.294	73	R207	1162.8695	2	525.739	35
C108	457.5115	4	294.962	74	R208	1216.846	1	516.846	48
C109	460.7785	4	296.32	78	R209	1211.722	2	623.444	56
C201	336.2445	2	272.599	51	R210	1188.309	2	576.618	55
C202	562.7405	2	335.237	51	R211	1170.9835	2	541.967	54
C203	357.611	2	315.222	53	RC101	834.0375	5	537.21	109
C204	345.166	2	290.332	51	RC102	830.4555	4	409.024	86
C205	463.9965	2	250.551	50	RC103	821.004	3	6343.002	82
C206	491.8995	2	272.688	51	RC104	779.34	3	322.17	84
C207	368.7555	2	337.511	52	RC105	821.979	5	493.626	104
C208	371.42	1	231.42	50	RC106	972.286	5	586.899	109
R101	1410.5465	8	634.897	131	RC107	866.3735	4	491.701	110
R102	1309.9965	6	494.782	82	RC108	786.458	4	410.003	101
R103	1527.1975	5	552.363	96	RC201	1144.287	2	591.525	61
R104	1761.278	4	464.869	93	RC202	965.827	2	509.799	53
R105	1445.993	6	572.628	116	RC203	882.496	2	454.625	50
R106	1522.5455	5	541.025	112	RC204	1639.951	1	463.317	49
R107	1675.7005	4	507.405	98	RC205	1492.1295	2	660.689	57
R108	1621.9425	4	477.727	106	RC206	1171.032	2	625.992	56
R109	1726.079	5	630.854	114	RC207	1329.764	2	649.213	57
R110	1721.2085	5	629.134	113	RC208	920.837	2	473.509	53
R111	1929.2685	5	618.696	113					
R112	1796.5975	5	587.553	99					

Tabla 5.2: Soluciones encontradas para las instancias con 25 clientes

Instancia	Costo Total	Número Vehículos	Distancia	Segundos	Instancia	Costo Total	Número Vehículos	Distancia	Segundos
C101	1026.527	6	494.39	227	R201	1229.2565	3	1467.919	157
C102	1006.4125	6	487.992	221	R202	1311.6425	3	1186.28	148
C103	1102.838	6	668.93	221	R203	1203.068	3	1072.498	147
C104	1198.2445	6	569.662	221	R204	884.068	2	734.408	140
C105	1090.5745	7	715.926	242	R205	2624.497	3	1394.168	151
C106	1007.385	6	627.812	243	R206	1152.811	3	1296.994	145
C107	1053.525	7	670.686	232	R207	2871.275	3	1076.266	134
C108	1018.5205	7	724.508	241	R208	894.983	2	754.983	134
C109	1103.3345	7	763.309	238	R209	1196.6235	3	1411.936	153
C201	736.4195	2	485.807	129	R210	1107.3245	3	1299.376	151
C202	956.799	3	592.32	130	R211	1045.547	3	1151.727	147
C203	882.414	2	756.081	135	RC101	1632.0375	9	1049.692	355
C204	897.587	2	587.316	137	RC102	1613.864	9	1014.858	309
C205	747.692	2	657.902	127	RC103	1610.1765	8	924.34	307
C206	1108.067	2	856.364	130	RC104	1452.766	6	704.191	293
C207	864.778	3	741.532	137	RC105	1825.5935	11	1381.644	285
C208	911.447	2	407.477	125	RC106	2135.7285	10	1370.873	414
R101	1888.373	12	1169.403	383	RC107	1974.649	9	1270.256	422
R102	1930.652	10	1090.967	319	RC108	2171.8085	8	1218.381	396
R103	1993.563	9	988.958	321	RC201	3721.13	3	1895.343	189
R104	1953.9425	7	792.618	277	RC202	2886.7965	3	1210.435	163
R105	2137.7335	9	1155.578	346	RC203	2448.56	3	1172.039	157
R106	2290.804	8	1063.828	327	RC204	2329.479	2	709.937	131
R107	2076.4485	8	969.191	327	RC205	2515.675	4	1456.296	165
R108	1885.9805	7	836.045	308	RC206	2722.7695	4	1661.114	179
R109	2437.5715	10	1329.156	402	RC207	2743.506	4	1578.32	176
R110	2314.523	9	1229.174	396	RC208	2892.151	3	1073.449	142
R111	2177.094	8	1073.758	358					
R112	2313.3175	8	1131.73	337					

Tabla 5.3: Soluciones encontradas para las instancias con 50 clientes

Instancia	Costo Total	Número Vehículos	Distancia	Segundos	Instancia	Costo Total	Número Vehículos	Distancia	Segundos
C101	2473.9195	12	1496.623	723	R201	5412.2715	5	2887.397	356
C102	2745.536	15	1912.859	710	R202	6629.0295	5	2264.252	345
C103	3074.3765	11	1900.476	739	R203	5867.339	4	1869.072	404
C104	2994.074	11	1564.823	720	R204	6356.8555	3	1262.458	313
C105	3004.288	13	2245.174	817	R205	6370.808	6	2458.381	349
C106	3009.356	14	2418.232	853	R206	6633.2425	5	2199.071	318
C107	2405.9695	15	1646.109	772	R207	5864.553	4	1837.144	323
C108	3096.8305	14	2673.774	828	R208	4727.1865	3	1248.547	306
C109	2731.884	14	1927.247	753	R209	5510.241	5	2503.616	346
C201	2062.6055	4	983.741	329	R210	5952.382	5	2446.845	344
C202	3060.6785	5	2240.949	343	R211	5134.033	4	1947.995	318
C203	1921.8825	5	1392.41	363	RC101	3783.056	20	2479.463	1015
C204	1812.032	4	1373.502	376	RC102	3698.831	17	2421.008	955
C205	2006.907	5	836.156	345	RC103	3285.971	14	2019.454	855
C206	2353.543	5	1965.372	373	RC104	3209.289	12	1634.916	912
C207	2644.367	5	1974.399	363	RC105	3914.792	23	2917.204	1289
C208	1576.781	5	784.306	314	RC106	4116.63	22	2989.561	1273
R101	3705.961	20	1994.794	1014	RC107	4474.6495	18	2820.914	1098
R102	3601.6165	19	1939.584	937	RC108	3646.413	16	2292.013	954
R103	3859.0065	15	1728.355	936	RC201	5577.1715	7	3477.567	437
R104	3488.3415	12	1370.503	865	RC202	6476.846	5	2905.273	398
R105	3932.135	19	2162.829	961	RC203	5637.0665	4	2128.696	377
R106	4263.7675	16	1954.121	904	RC204	4682.5535	3	1456.346	315
R107	3856.8425	13	1763.206	933	RC205	6384.5105	6	3140.034	410
R108	3562.8215	11	1350.557	824	RC206	5879.8255	7	3180.735	434
R109	4372.168	20	2528.697	1067	RC207	6060.759	6	3067.089	404
R110	4521.8455	17	2262.944	1029	RC208	5543.0345	5	2279.413	342
R111	4306.7215	16	2180.623	976					
R112	4181.2435	15	1957.867	874					

Tabla 5.4: Soluciones encontradas para las instancias con 100 clientes

En la Tabla 5.6 se presenta la comparación entre los algoritmos. Se muestra para cada instancia la comparación tanto en el valor de costo total como también la distancia total recorrida, agregando la columna con la diferencia entre ambos valores. Para cada una de las instancias elegidas se probó para los 3 tamaños de instancias.

Se puede observar que en algoritmo CA se obtiene la mayoría de los mejores resultados encontrados, los pocos casos en los que el algoritmo CSA tiene mejores valores se presenta en el costo total, pero como se puede ver, en dichos casos tiene mejor costo pero el valor de la distancia recorrida sigue siendo mayor. Esto se presenta debido al uso de diferentes tipos de vehículos en los dos algoritmos, ya que se puede observar en la Tabla 5.5 el número de vehículos empleados en cada algoritmo, en algunos casos, el número de vehículos usados llega a ser el mismo en ambos métodos, sin embargo, hay casos en los que en el algoritmo CSA se presenta un valor de costo menor que en el algoritmo CA pero el número de vehículos es mayor en CSA que en CA.

Instancia	CA			CSA		
	25 clientes	50 clientes	100 clientes	25 clientes	50 clientes	100 clientes
C101	3	6	12	4	6	13
C109	4	7	14	4	8	15
C201	2	2	4	2	3	5
C208	1	2	5	2	4	6
R101	8	12	20	8	13	23
R112	5	8	15	5	9	17
R201	2	3	5	2	3	6
R211	2	3	4	2	3	5
RC101	5	9	20	6	11	23
RC108	4	8	16	6	11	19
RC201	2	3	7	3	4	9
RC208	2	3	5	2	3	5

Tabla 5.5: Número de vehículos usados en los 2 algoritmos

Inst.	NC	CA		CSA		Dev (%)	Inst.	NC	CA		CSA		Dev (%)
		Costo	Distancia	Costo	Distancia				Costo	Distancia	Costo	Distancia	
C101	25	476.3145	196.866	544.2015	266.79	14.25	R201	25	1202.799	605.598	1253.165	706.33	4.19
	50	1026.527	494.39	1540.2965	1023.941	33.36		50	1229.2565	1467.919	2772.318	1636.79	125.53
	100	2473.9195	1496.623	2597.759	1782.902	4.97		100	5412.2715	2887.397	5406.0095	3018.571	-0.16
C109	25	460.7785	296.32	483.726	343.224	4.98	R211	25	1170.9835	541.967	1261.3855	722.771	7.72
	50	1103.334	763.309	1406.952	1079.811	27.52		50	1045.547	1151.727	2631.933	1383.552	151.73
	100	2731.884	1927.247	2498.6005	1980.117	-8.54		100	5134.033	1947.995	5166.0115	2125.92	0.62
C201	25	336.2445	272.599	560.3905	343.591	66.66	RC101	25	834.0375	537.21	1082.514	728.104	29.79
	50	736.4195	485.807	1066.5675	673.849	44.75		50	1632.0375	1049.692	1761.9135	1327.129	7.96
	100	2062.6055	983.741	2137.4775	795.748	3.62		100	3785.056	2479.463	3536.331	2822.625	-6.52
C208	25	371.42	231.42	494.3875	282.861	33.12	RC108	25	786.458	410.003	1264.3525	842.219	60.77
	50	911.497	407.477	1037.4775	459.525	13.82		50	2171.8085	1218.381	2395.322	1782.476	10.29
	100	1576.781	784.306	1699.561	877.684	7.79		100	3646.413	2292.013	4160.285	2801.053	14.10
R101	25	1410.5465	634.897	721.775	658.461	-48.83	RC201	25	1144.287	591.525	1556.348	997.416	36.01
	50	1888.373	1169.403	1859.9835	1281.45	-1.50		50	3721.13	1895.343	3193.543	2161.776	-14.18
	100	3705.961	1994.794	3616.448	2156.245	-2.42		100	5577.1715	3477.567	6263.754	4184.848	12.31
R112	25	1796.5975	587.553	1110.218	732.688	-38.20	RC208	25	920.837	473.509	1205.427	638.858	30.91
	50	2313.3175	1131.73	2372.934	1214.135	2.58		50	2892151	1073.449	2872.657	1252.244	-0.67
	100	4181.2435	1957.867	4463.528	2305.168	6.75		100	5543.0365	2279.413	6396.276	2689.749	15.39

Tabla 5.6: Comparación entre heurísticas

En la Tabla 5.6 se puede observar que en algunas de las instancias en su distinto tamaño se obtiene el porcentaje dev negativo. Esto se debe a la configuración de la flota de vehículos, es estos casos, el algoritmo CSA utiliza vehículos con costos fijos y costos variables más pequeños, y como se puede ver en la Tabla 5.5, en ocasiones usa un número mayor de vehículos, ya que al usar vehículos de menor costo, su capacidad también es menor.

Por ejemplo, la solución de la instancia C109 con 100 clientes, para el algoritmo CA se utilizan 4 vehículos de tipo 1, 9 vehículos de tipo 2 y 1 vehículo de tipo 3, dando un total de 14 vehículos con un costo fijo de \$975. Mientras que en el algoritmo CSA la solución obtenida consta de 15 vehículos, de los cuales, 6 vehículos son de tipo 1 y 9 vehículos de tipo 2, con un costo fijo de \$900. El costo variable, ya que el algoritmo CSA utiliza más vehículos de menor costo fijo, su costo variable también es menor.

En cuanto al tiempo de ejecución del algoritmo CSA, todas las instancias probadas se resolvieron en un tiempo de menos de un segundo; siendo este algoritmo más eficiente en cuanto a tiempo computacional se refiere. Sin embargo, dado que nuestro objetivo es la minimización del costo total, el algoritmo CA nos proporciona mejores resultados.

En la Figura 5.7 y en la Figura 5.8, se muestra el diagrama de la solución para la instancia R211 de tamaño de 25 clientes, con el método CA y el método CSA respectivamente. Consultando la Tabla 5.6, los valores de distancia para el método CA reduce más de 33 (%) el valor de la distancia del método CSA. Se puede observar que la ruta de color verde en la Figura 5.8, los clientes visitados se encuentran a mayor distancia uno de otro, mientras que en la ruta de la Figura 5.7, los clientes se encuentran más cercanos.

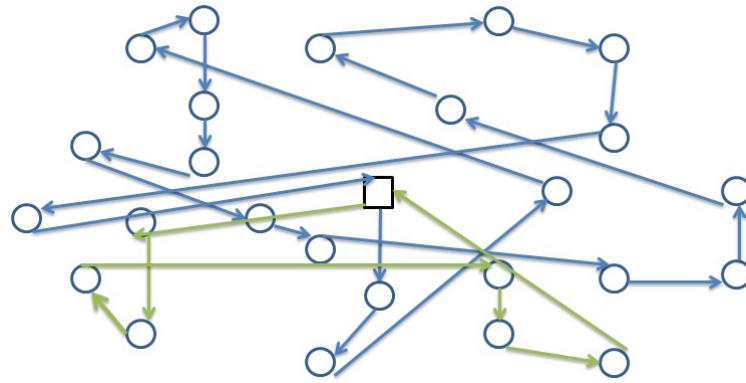


Figura 5.7: Diagrama solución algoritmo CA

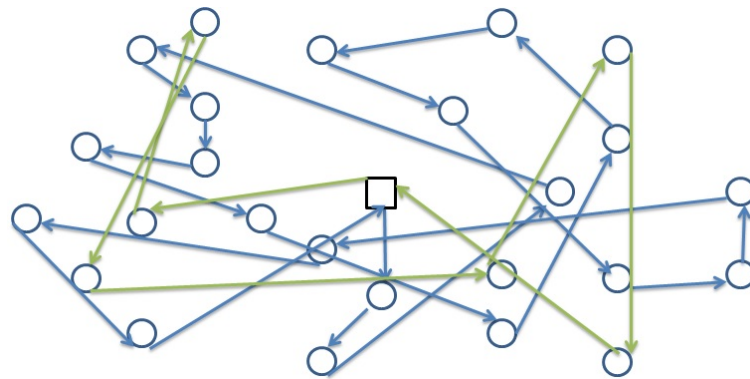


Figura 5.8: Diagrama solución algoritmo CSA

Los dos algoritmos pueden ser usados en la organización de la cual nos basamos para crear este problema, les brinda dos opciones con las cuales podrán tomar decisiones y además aunada la experiencia de los distribuidores, las soluciones pueden ser mejoradas a su propio criterio.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado con un problema basado en la problemática presentada en una empresa de logística ubicada en Monterrey, Nuevo León, México. La organización, desea encontrar la configuración de rutas que debe seguir para brindar el servicio de entrega a su conjunto de clientes; teniendo como objetivo la minimización del costo total de operación.

Para dar solución a este problema en primera instancia se planteó el modelo matemático asociado a la problemática, se realizó la experimentación computacional necesaria la cual nos dió soluciones para instancias con menos de 25 clientes. Para instancias mayores a 25 clientes, dados los criterios de parada establecidos, no fue posible encontrar soluciones de forma exacta. Por razones de la organización, deben resolver el problema diariamente y en un tiempo razonable; se diseñaron algoritmos de solución alternas con las cuales se resuelva el problema en un tiempo computacional razonable.

Por ende, se elaboró una heurística constructiva como metodología de solución. Este algoritmo constructivo está basado en la heurística del vecino más cercano, con la diferencia de que en nuestra metodología se incluyó aleatoriedad y se tomó la

filosofía multiarranque con el fin de ofrecer mejores soluciones que una heurística simple.

Para la evaluación del algoritmo, se realizó la experimental computacional la cual se comparó con el método elaborado pero quitando la parte aleatoria y multiarranque. De acuerdo a la experimentación presentada en el Capítulo 5, se puede concluir que la metodología propuesta presenta mejores resultados que la heurística del vecino más cercano en su versión estándar.

6.2 TRABAJO FUTURO

Como trabajo a futuro se tiene la implementación de la metodología en la empresa que dio origen al presente proyecto de tesis. Otro punto es mejorar la metodología presentada, creemos que este procedimiento puede ser mejorado, o bien, usado como fase inicial de otra metodología más compleja.

Además se tiene pensado en abordar el problema en su versión estocástica ya que como se mencionó en la descripción del problema, la organización de enfrenta con esta problemática a diario, ya que el factor demanda lo conocen con un día de anticipación. Es por ello, que se pretende tomar el parámetro como estocástico y así tener un horizonte de planeación a largo plazo.

Finalmente, se desea presentar a la empresa una interfaz gráfica del procedimiento propuesto, para que sirva como soporte al tomador de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALFREDO TANG MONTANÉ, F. y R. D. GALVAO, «A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service», *Computers & Operations Research*, **33**(3), págs. 595–619, 2006.
- [2] ARCHETTI, C. y M. G. SPERANZA, «The split delivery vehicle routing problem: A survey», en *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, Springer, págs. 103–122, 2008.
- [3] ARCHETTI, C., M. G. SPERANZA y A. HERTZ, «A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem», *Transportation Science*, **40**(1), págs. 64–73, 2006.
- [4] AZI, N., M. GENDREAU y J.-Y. POTVIN, «An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles», *European Journal of Operational Research*, **202**(3), págs. 756–763, 2010.
- [5] BATISTA, B. M. y F. GLOVER, «Introducción a la Búsqueda Tabú», .
- [6] BELENGUER, J., M. MARTINEZ y E. MOTA, «A lower bound for the split delivery vehicle routing problem», *Operations Research*, **48**(5), págs. 801–810, 2000.
- [7] BELFIORE, P., H. T. YOSHIDA YOSHIZAKI *et al.*, «Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil», *European Journal of Operational Research*, **199**(3), págs. 750–758, 2009.

-
- [8] BELFIORE, P. y H. T. YOSHIKAWA, «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.
- [9] BRANDÃO, J. y A. MERCER, «A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem», *European Journal of Operational Research*, **100**(1), págs. 180–191, 1997.
- [10] BRÄYSY, O. y M. GENDREAU, «Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms», *Transportation science*, **39**(1), págs. 104–118, 2005.
- [11] BRÄYSY, O. y M. GENDREAU, «Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics», *Transportation science*, **39**(1), págs. 119–139, 2005.
- [12] CORDEAU, J.-F., G. DESAULNIERS, J. DESROSIERS, M. M. SOLOMON y F. SOUMIS, «VRP with time windows», *The vehicle routing problem*, **9**, págs. 157–193, 2002.
- [13] DANTZIG, G., R. FULKERSON y S. JOHNSON, «Solution of a large-scale traveling-salesman problem», *Journal of the operations research society of America*, **2**(4), págs. 393–410, 1954.
- [14] DANTZIG, G. B. y J. H. RAMSER, «The truck dispatching problem», *Management science*, **6**(1), págs. 80–91, 1959.
- [15] DELL'AMICO, M., M. MONACI, C. PAGANI y D. VIGO, «Heuristic approaches for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows», *Transportation Science*, **41**(4), págs. 516–526, 2007.
- [16] DESROCHERS, M., J. DESROSIERS y M. SOLOMON, «A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows», *Operations research*, **40**(2), págs. 342–354, 1992.

-
- [17] DESROCHERS, M., J. K. LENSTRA, M. W. SAVELSBERGH y F. SOUMIS, «Vehicle routing with time windows: optimization and approximation», *Vehicle routing: Methods and studies*, **16**, págs. 65–84, 1988.
- [18] DROR, M. y P. TRUDEAU, «Savings by split delivery routing», *Transportation Science*, **23**(2), págs. 141–145, 1989.
- [19] DROR, M. y P. TRUDEAU, «Split delivery routing», *Naval Research Logistics*, **37**(3), págs. 383–402, 1990.
- [20] FEO, T. A. y M. G. RESENDE, «Greedy randomized adaptive search procedures», *Journal of global optimization*, **6**(2), págs. 109–133, 1995.
- [21] GENDREAU, M., G. LAPORTE y R. SÉGUIN, «Stochastic vehicle routing», *European Journal of Operational Research*, **88**(1), págs. 3–12, 1996.
- [22] GHEYSENS, F., B. GOLDEN y A. ASSAD, «A comparison of techniques for solving the fleet size and mix vehicle routing problem», *Operations-Research-Spektrum*, **6**(4), págs. 207–216, 1984.
- [23] 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.
- [24] GOLDEN, B. L. y A. A. ASSAD, «Perspectives on Vehicle Routing: Exciting New Developments», *Operations Research*, **34**(5), págs. 803–810, 1986.
- [25] HO, S. C. y D. HAUGLAND, «A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries», *Computers & Operations Research*, **31**(12), págs. 1947–1964, 2004.
- [26] LIU, F.-H. y S.-Y. SHEN, «The fleet size and mix vehicle routing problem with time windows», *Journal of the Operational Research Society*, págs. 721–732, 1999.

- [27] MARTÍ, R. y M. LAGUNA, «Scatter Search: Diseño Básico y Estrategias avanzadas.», *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, **7**(19), págs. 123–130, 2003.
- [28] RENAUD, J., G. LAPORTE y F. F. BOCTOR, «A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem», *Computers & Operations Research*, **23**(3), págs. 229–235, 1996.
- [29] REPOUSSIS, P. y C. TARANTILIS, «Solving the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows via adaptive memory programming», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **18**(5), págs. 695–712, 2010.
- [30] ROCHAT, Y. y F. SEMET, «A tabu search approach for delivering pet food and flour in Switzerland», *Journal of the Operational Research Society*, págs. 1233–1246, 1994.
- [31] ROCHAT, Y. y É. D. TAILLARD, «Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing», *Journal of heuristics*, **1**(1), págs. 147–167, 1995.
- [32] ROSENKRANTZ, D. J., R. E. STEARNS y P. M. LEWIS, II, «An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem», *SIAM journal on computing*, **6**(3), págs. 563–581, 1977.
- [33] SEMET, F. y E. TAILLARD, «Solving real-life vehicle routing problems efficiently using tabu search», *Annals of Operations research*, **41**(4), págs. 469–488, 1993.
- [34] SOLOMON, M. M., «Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints», *Operations research*, **35**(2), págs. 254–265, 1987.
- [35] SOLOMON, M. M., «Instancias para el VRPTW», recurso disponible gratuitamente en: <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>, 2005.

-
- [36] TAILLARD, É., P. BADEAU, M. GENDREAU, F. GUERTIN y J.-Y. POTVIN, «A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows», *Transportation science*, **31**(2), págs. 170–186, 1997.
- [37] TAN, K. C., L. H. LEE, Q. ZHU y K. OU, «Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows», *Artificial intelligence in Engineering*, **15**(3), págs. 281–295, 2001.
- [38] TOTH, P. y D. VIGO, «An overview of vehicle routing problems», *The vehicle routing problem*, **9**, págs. 1–26, 2002.
- [39] YAMAN, H., «Formulations and valid inequalities for the heterogeneous vehicle routing problem», *Mathematical Programming*, **106**(2), págs. 365–390, 2006.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Dory Angélica Alvarez Porras

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias
en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

DISEÑO ÓPTIMO DE RUTAS PARA UNA EMPRESA
QUE BRINDA SERVICIOS DE PAQUETERÍA,
MENSAJERÍA Y LOGÍSTICA

Nací en Monterrey, Nuevo León el 12 de agosto de 1988. Egresada en el 2010 de la Licenciatura en Matemáticas, en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Aceptada en el Posgrado en Ingeniería de sistemas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en enero de 2012. En donde realicé este proyecto de tesis bajo la tutela de la Dra. Sara Verónica Rodríguez Sánchez, y a su vez asesorada por la Dra. Angélica Salazar Aguilar, y el Dr. Gregorio Tirado Domínguez.