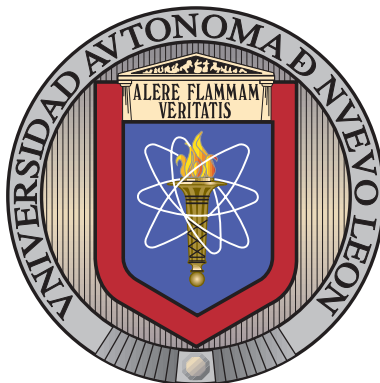


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DEL TRANSPORTE EN UNA EMPRESA
LÓGISTICA

POR

JÉSSICA MABEL GÓMEZ PÉREZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO
CON ORIENTACIÓN EN DISEÑO Y ANÁLISIS

OCTUBRE DEL 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROBLEMA DEL TRANSPORTE EN UNA EMPRESA
LÓGISTICA

POR

JÉSSICA MABEL GÓMEZ PÉREZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO
CON ORIENTACIÓN EN DISEÑO Y ANÁLISIS

OCTUBRE DEL 2019



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 «Problema del transporte en una empresa logística», realizada por el alumno Jéssica Mabel Gómez Pérez, con número de matrícula 1447530, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

Asesor

Dr. Tomás Eloy Salais Fierro

Revisor

Dr. Luis Alfonso Infante Rivera

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre del 2019

Terminar este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo profesional de mi tutor la Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa, quien con paciencia encauso mi trabajo con sus conocimientos.

Mi mentor y coach, por impulsarme a estudiar esta Maestria y confiar en mi capacidad de lograr este reto.

A mis familiares

A mi madre Estefana Perez Quintanilla y padre Guillermo Gomez Ramos por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. A mi hermana Stephany Denise Gomez Perez por apoyarme en momentos difíciles y no dejar que me rinda. Mi sobrinos, Roberto y Antonella Cantú Gómez para que vean en mí un ejemplo a seguir.

A mis maestros. Por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis.

A mis amigos. Por compartir los buenos y malos momentos.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | x |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.2. OBJETIVO | 4 |
| 1.3. HIPOTESIS | 5 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 5 |
| 1.5. METODOLOGÍA | 5 |
| 1.6. ESTRUCTURA DE LA TESIS | 6 |
| 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA | 7 |
| 2.1. PROBLEMA DE RUTEO DE TRANSPORTE | 9 |
| 2.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA EL VRP | 15 |
| 2.2.1. MÉTODOS EXACTOS | 15 |
| 2.2.2. MÉTODOS HEURÍSTICOS | 15 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.3. METAHEURÍSTICAS | 17 |
| 3. METODOLOGÍA | 18 |
| 3.1. Programación lineal- Optimización | 18 |
| 3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 19 |
| 3.3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA | 20 |
| 4. EXPERIMENTACIÓN | 23 |
| 4.1. SOFTWARE- GUROBI | 23 |
| 4.2. EXPERIMENTACIÓN | 24 |
| 4.3. DEFINICIÓN DE INSTANCIAS | 24 |
| 4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO | 25 |
| 4.5. CASO DE ESTUDIO | 26 |
| 5. CONCLUSIÓN | 29 |
| 5.1. CONTRIBUCIÓN | 30 |
| 5.2. TRABAJO A FUTURO | 30 |
| A. Este es un apéndice | 31 |
| A.1. Citas bibliográficas | 31 |
| A.2. Comillas | 32 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| 1.1. Tipos de vehículos de la empresa logística | 3 |
| 1.2. Descripción del problema del trabajo de tesis | 4 |
| 2.1. Problema de ruteo de transporte | 10 |
| 2.2. Problema de ruteo de transporte | 13 |
| 2.3. Problema de ruteo de transporte | 14 |
| 2.4. Autores con el uso del VRP | 16 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| 4.1. Instancia preliminar | 25 |
| 4.2. Resultado de la instancia preliminar | 26 |
| 4.3. Instancia 1- Caso práctico | 26 |
| 4.4. Resultado instancia 1- Caso práctico | 27 |
| 4.5. Instancia 2- Caso práctico | 27 |
| 4.6. Resultado instancia 2- Caso práctico | 28 |
| 4.7. Instancia 3- Caso práctico | 28 |
| 4.8. Resultado instancia 3- Caso práctico | 28 |

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo merecen reconocimiento especial, primero a mi familia, con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

A mi mentor, coach, modelo a seguir, quien con su experiencia, sabiduría, conocimiento y motivación me impulsó a seguir desarrollándome profesionalmente.

A mi comité Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa, Dr. Luis Alfonso Infante Rivera y Dr. Tomás Eloy Salas Fierro, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y CONACyT, por seguir desarrollando maestrías para el aprendizaje y desarrollo para los estudiantes, gracias a esto hoy estoy más preparada.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se menciona la cadena de suministro, sus conceptos básicos, así como las decisiones que deben de considerar en las empresas para ser eficiente y competitivas.

Así mismo, explicaremos la problemática sobre el ruteo de vehículos que tiene una empresa logística e indicaremos, los objetivos a cumplir y la justificación del proyecto y para finalizar describiremos nuestra hipótesis.

La cadena de suministro (conocida como sus siglas en inglés Supply Chain) (?) se creó en 1905 y se define como la integración de todos los procesos desde la fabricación del producto hasta la entrega al cliente. Para que la cadena de suministro tenga éxito necesita la integración de la logística, los procesos de negocios o las actividades y las empresas, tanto dentro de una empresa como entre empresas (?).

Council of Logistics Management (?) define que la logística como “parte del proceso de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo eficiente, eficaz hacia delante y marcha atrás y almacenamiento de mercancías, servicios, y la información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo con el fin de satisfacer los requisitos de clientes”.

La logística es la parte de la administración de la cadena de suministro donde

planifica, implementa y controla el flujo y almacenamiento eficiente y efectivo de los bienes, servicios e información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo para satisfacer a los clientes. Así mismo ayuda en la optimización de los procesos de producción y la distribución de las mercancías con la finalidad de promover la eficiencia y la competitividad dentro de las empresas. Una de las estrategias de la cadena de suministro son la toma de decisiones que se clasifican en: estratégicas, tácticas y operativas, esto con la finalidad de incrementar la competitividad de la empresa.

Mohammadi Bidhandi (?), menciona que las “decisiones estratégicas” son el horizonte de planeación a largo plazo, durante esta etapa se define la estructura de la cadena (diseño), la ubicación y las capacidades de producción, los productos que se fabricaran o almacenaran y el tipo de información que se utilizará.

Las decisiones tácticas son a mediano plazo, durante esta etapa tiene lugar la planeación de la producción, la estimación de la demanda, la planeación de los inventarios, entre otras. Finalmente, las decisiones operativas tienen efecto a corto plazo, durante esta etapa se toman las decisiones respecto a los pedidos, se establecen las fechas en que debe completarse el pedido, se generan listas de surtido en el almacén, se asignan los pedidos a los transportes y envío, se establecen los itinerarios de los pedidos; cuando se toman estas decisiones ya se han establecido tanto las políticas de planeación como la estructura de la cadena.

Dentro de los servicios logísticos cuentan con actividades físicas (transporte, almacenamiento, etc.), y actividades no físicas (selección de contratistas, las negociaciones fletes). Ballou (1987) nos explica que la “transportación desempeña un papel fundamental en las actividades logísticas cubriendo un 67% los costos logísticos, así como también representa el movimiento de los bienes de un lugar a otro. Para este trabajo, nos estaremos enfocando en las actividades físicas, debido a que en estas se utiliza los modos de transporte.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente se tienen una empresa que forma parte de una división de Negocios Estratégicos y que está dedicada a proveer servicios logísticos integrales. La estrategia de dicha empresa dentro de su servicio logístico del transporte terrestre de carga su estrategia para la asignación de las rutas en su servicio logístico, es basado en la demanda del cliente que se obtuvo al final del año. Al inicio del año se toma la decisión de que vehículo se va a seleccionar para realizar los movimientos de carga, debido a que la flota que existen son dos configuraciones vehiculares, los compuestos simples para un remolque y un semirremolque (53 pies) con una capacidad máxima de 20 toneladas de carga útil y los dobles que consisten en un remolque y dos semirremolques (43 pies), con una capacidad de 25 toneladas de carga útil cada uno de las unidades (Figura 1.1) .



Figura 1.1: Tipos de vehículos de la empresa logística

En las asignaciones de rutas, el planeador logístico no considera ciertas variables (Costos de permisos, tiempo tránsito, etc) que hacen que se incremente exponencialmente el costo operativo del transporte terrestre. Este costo se ve reflejado en la tarifa al cliente, teniendo como consecuencia la pérdida de clientes, así como el prestigio de la empresa. En el presente trabajo de tesis, se estudiará el problema de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés), para la asignación de rutas, desde el centro de distribución hacia el cliente, con una flotilla de vehículos disponibles con cierta capacidad, esto con la finalidad de minimizar el costo de transporte (Figura 1.2)

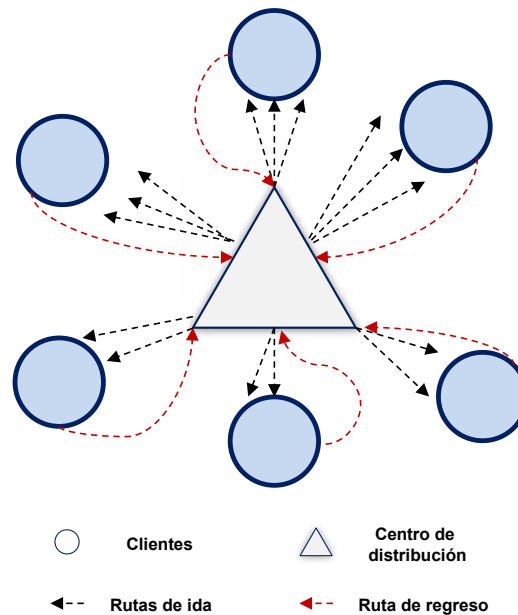


Figura 1.2: Descripción del problema del trabajo de tesis

1.2 OBJETIVO

Desarrollar una herramienta de toma de decisiones basada en la formulación matemática de un problema de transporte para una empresa logística con servicios integrales.

1.3 HIPOTESIS

Con el uso de herramientas de Investigación de Operaciones se podrán analizar los datos y costos operativos para minimizar los costos operativos de la empresa logística.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a que no se cuenta con un análisis que nos ayude a determinar las rutas de la empresa logística, los costos excesivos en los que incurren los traslados de la mercancía a los centros de distribución por diferentes rutas, se observa la necesidad de desarrollar un análisis de investigación de operaciones.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para la realización de este trabajo de tesis consiste en los siguientes pasos generales:

1. Revisión de literatura sobre problemas de ruteo.
 - a) Búsqueda de problema de ruteo.
 - b) Aplicaciones de problema de ruteo.
 - c) Metodologías de solución para el problema estudiado.
2. Análisis de información encontrada y metodologías de solución.
3. Planteamiento de la situación a estudiar.
4. Formulación matemática sobre el problema de ruteo tipo estrella.

5. Validación del modelo matemático.
6. Recopilación de datos para el caso de estudio.
7. Experimentación del modelo con los datos de la problemática.
8. Análisis e interpretación de resultados.
9. Conclusiones.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el segundo capítulo se presentarán los antecedentes y trabajos encontrados en la literatura, considerados como pertinentes al tema tratado en esta investigación, resolver problemas similares. En el tercer capítulo se presenta la descripción formal del problema así como los supuestos que se van a considerar. Además, se presenta la propuesta de la formulación. En el cuarto capítulo se mencionan el caso de estudio y la experimentación. En el quinto capítulo se analizaran los datos del resultado del modelo. En el sexto capítulo se mencionan las conclusiones del proyecto. aplicando conceptos de investigación de operaciones el cual va apoyar en encontrar las rutas óptimas con un menos costo operativo.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN DE LA LITERATURA

En este capítulo, se presentan los antecedentes y trabajos encontrados en la literatura, considerados como pertinentes al tema tratado en esta investigación, en el cual se dividen en dos secciones, en la primera sección se presenta la revisión de literatura sobre la definición formal, así como su clasificación y para finalizar, en la segunda sección se presentará la revisión a diferentes estrategias utilizadas para resolver problemas similares.

Dentro de la gestión de la cadena de suministro en el mundo empresarial, la gestión logística es un tema de suma importancia ya que se ocupa del flujo físico de materiales desde los proveedores hasta los consumidores.

Drew y Smith (1995) definen a la gestión logística como aquella que planifica, implementa y controla el flujo y almacenamiento directo e inverso de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo para cumplir con los requisitos del cliente de manera eficiente y efectiva.

La importancia de llevar a cabo una buena gestión logística reside principalmente en los costos y el servicio al cliente. Los costos logísticos incluyen la gestión de inventarios, el procesamiento de pedidos, los fletes de transporte, los seguros, el almacenamiento, el manejo, la carga y descarga, el embalaje y la documentación. Estos costos tienen un peso muy importante en el precio

final del producto.

Una buena gestión logística no sólo economiza los costos señalados, sino que también reduce o elimina los costos ocultos más difíciles de valorar pero no por ello menos importantes. Estos costos, que se pueden evitar, incluyen los asociados a la pérdida de ventas por falta de satisfacción de clientes y distribuidores, el costo por demora, los intereses del capital invertido en la mercancía, costos directamente relacionados con la duración del envío y las pérdidas por falta de un seguro que cubra los riesgos.

El transporte a menudo representa el elemento individual más importante en los costos dentro de la logística y para su reducción, encontrar las rutas óptimas es un problema. Al diseñar una red de transporte se ve afectado el rendimiento de una cadena de suministro, ya que el diseño no solo se limita a decidir sobre el establecimiento de la infraestructura adecuada, sino que también se ocupa de tomar las decisiones correctas de transporte. Una red de transporte bien diseñada permite que una cadena de suministro logre el grado deseado de capacidad de respuesta a un menor costo (Chakroborty y Dwivedi, 2002).

Dentro de los problemas que se pueden presentar al no contar con una planificación dentro del transporte se encuentran los plazos no cumplidos, entregas tardes de un mercancía o producto puede significar perder a un cliente o peor aún la lealtad, por lo que la correcta coordinación de todas las actividades, desde que se inicia una operación hasta que se termina, constituye una labor fundamental. Esta labor de coordinación de todas las fases necesarias para que el cliente reciba en tiempo y forma su mercancía es lo que se conoce como logística, y dentro de esta actividad logística el transporte juega un papel fundamental.

Al realizar una operación de carga y distribución (planificación y operativas), con un vehículo que debe atender a más de un cliente es necesario optimizar la ruta de entrega para minimizar la distancia de conducción y el trabajo de descarga. Varios autores han estudiado la optimización de la entrega, que se

conoce como el problema del enrutamiento de vehículos por sus siglas en inglés (VRP). La gestión de la entrega de bienes y servicios, así como también el uso de procedimientos de optimización, se consideran de suma importancia ya que emiten ahorros sustanciales entre el 5 % a 20 % de los costos sobre el transporte terrestre.

2.1 PROBLEMA DE RUTEO DE TRANSPORTE

El VRP es un problema importante en los campos de transporte, distribución y logística, cuyo objetivo es formar una ruta con el menor costo para atender a todos los clientes.

El problema de ruteo de vehículos, es un problema clásico de optimización donde, dado a un conjunto de vehículos, ha sido ampliamente estudiado, Dantzig y Ramser (1959) propusieron la primera formulación de programación matemática y el enfoque algorítmico. También describieron VRP con una aplicación en el mundo real sobre la entrega de gasolina a las estaciones de servicio.

Clarke y Wright (1964) propusieron una heurística codiciosa efectiva que mejoró el enfoque de Dantzig-Ramser. Después de estos dos artículos, se proponen muchos modelos y algoritmos para la solución óptima y aproximada de las diferentes versiones del VRP (Toth y Vigo 2002).

El VRP consta de componentes son las red de carreteras, clientes, rutas, flota de vehículos, conductores, restricciones operacionales y sobre todo los objetivos de optimización, minimización del costo de transporte, equilibrado de las rutas y minimización de las penalizaciones por servicio parcial de algunos clientes

Las variaciones en el planteamiento del problema, tales como los criterios y las restricciones consideradas, han generado el establecimiento de diferentes sistemas.

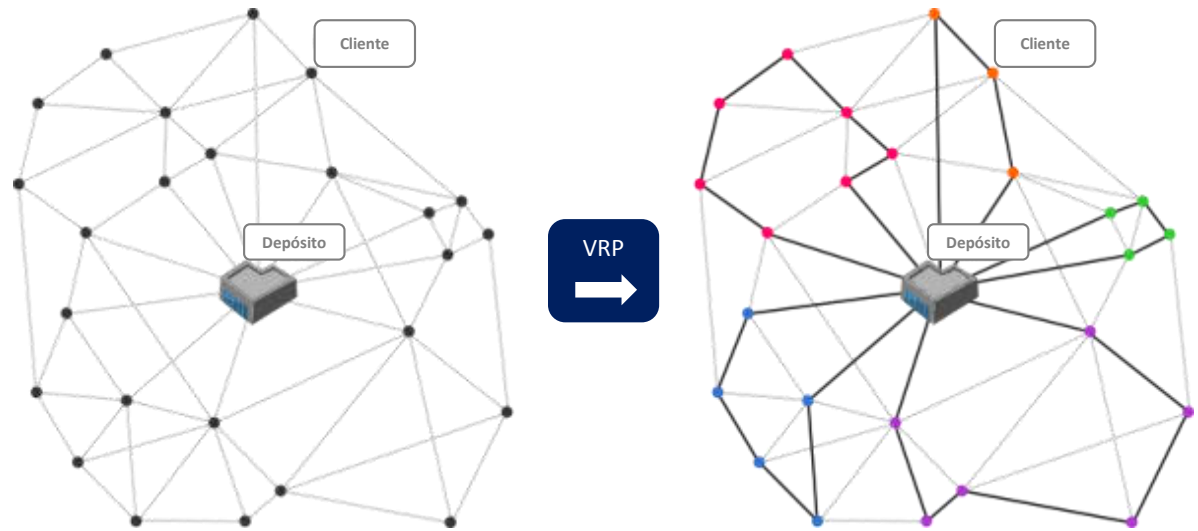


Figura 2.1: Problema clásico de ruteo de transporte

CVRP – VRP capacitado:

Es un VRP en el cual se una restricción de la capacidad de los vehículos, el cual consiste en abastecer desde un único deposito a un conjunto de clientes con las demandas conocidas, con una distribución de una flota homogénea de vehículo.

Cada cliente debe ser visitado exactamente por un único vehículo y una única vez y la demanda de cada cliente debe ser menor que la capacidad de los vehículos. Dado que todos los vehículos son idénticos, se puede determinar el número de vehículos necesarios para realizar el ruteo dividiendo la demanda total entre la capacidad de los vehículos.

El problema es encontrar las rutas que deben realizar los vehículos con el objetivo minimizar el costo total, ya sea distancia, tiempo, número de vehículos, etc. sin violar la capacidad de los vehículos, es decir, que la suma de las demandas de los clientes que se visitan en cada ruta no deben exceder la capacidad del vehículo. Esta capacidad de los vehículos que se establece como restricción

adicional al VRP puede ser el número de piezas que pueden transportar los vehículos, el volumen total que cabe dentro de la caja, el peso que los vehículos pueden soportar, los límites establecidos por gobierno, entre otras particularidades. Esta restricción dependerá de la situación particular para cada empresa. Algunos métodos de solución como ramificación y acotamiento, setcovering, heurísticas y metaheurísticas son algunos de los que podemos encontrar en (Toth & Vigo, 2002); una recopilación de algoritmos exactos y heurísticos en (Laporte G. , 1992); un algoritmo exacto para una red de dos flujos en (Baldacci, Hadjiconstantinou, & Mingozzi, 2004); un algoritmo genético (Machado, Pereira, Tavares, & Costa, 2002) y (Tavares, Baptista, Machado, & Ernesto, 2003); y (Olivera, 2004).

MDVRP – VRP con múltiples depósitos:

Es un VRP generalizado en el cual se cuenta con más de un depósito para satisfacer la demanda de cada cliente, por lo que como problema principal se tiene la asignación de los clientes a los depósitos.

La flota con la que se cuenta es una flota homogénea y al igual que en el VRP cada vehículo debe de partir de cada depósito, visitar a los clientes asignados y posteriormente regresar a dicho depósito. Si los clientes se asocian únicamente a un solo centro de distribución, entonces este problema se puede modelar como varios VRP independientes.

El objetivo de este problema, además de los de un VRP, es minimizar la flota de vehículos asignados a cada depósito.

Algunos algoritmos propuestos pueden ser analizados en: (Renaud, Laporte, & Boctor, 1996) y (Cordeau, Gendreau, & Laporte, 1997) se propone un método de búsqueda tabú en (Thangiah & Salhi, 2001) se propone una generalización del método clúster basado en algoritmo genético.

PVRP – VRP periódico: un conjunto de clientes debe ser visitado una o más veces durante un período de tiempo establecido. El objetivo principal, es

minimizar la flota de vehículos requerida y el tiempo total recorrido (Cacchiani, Hemmelmayr, & Tricoire, 2014).

SDVRP – VRP con entrega dividida: La cantidad de vehículos que se encarga de la distribución a un cliente es superior a uno, siempre que el costo total se reduzca (Bolduc, Laporte, Renaud, & Boctor, 2010).

SVRP – VRP estocástico: Una variable o más son de carácter aleatorio, tales como las demandas, el tiempo de aprovisionamiento y la disponibilidad del cliente para atender el abastecimiento (Allahviranloo, Chow, & Recker, 2014)

VRPPD – VRP con recogidas y entregas simultaneas: Se puede presentar cuando el cliente se encuentra inconforme con la mercancía entregada, por lo que realiza una devolución parcial o total de la misma, generando como principal consecuencia la necesidad de contemplar espacio adicional en el vehículo (Liu, Xie, Augusto, & Rodriguez, 2013) & (Coelho, Munhoz, Haddad, Souza, & Ochi, 2012).

VRPB – VRP con red de retorno: El cliente puede demandar o entregar la mercancía, de esta manera se generan dos subconjuntos de clientes al interior de las rutas, los consumidores y los vendedores; ocasionando una distribución mixta, lo cual representa la minimización de costos totales asociados (Yuyan, Jiafu, & Jing, 2013).

DCVRP – VRP con restricciones de capacidad y distancia: La capacidad de los vehículos es limitada y la longitud de los arcos que se realizan en una ruta, es decir las distancias (Tlili, Faiz, & Krichen, 2014).

OVRP – VRP abierto: el vehículo no está obligado a regresar al depósito, una vez haya finalizado su recorrido (Marinakis & Marinaki, 2014).

MFVRP – VRP con flota mixta: La flota de vehículos es homogénea, presentando variaciones en la capacidad y en los costos relacionados al transporte de la mercancía, tales como el combustible, programación y ejecución de mantenimientos (Subramanian, Vaz Penna, Uchoa, & Satoru Ochi, 2012).

VRPF – VRP difuso: Surge en respuesta a la dificultad para establecer demandas, tiempos de recorrido y ubicación de los clientes desconocidos. (Eksioglu, Volkan Vural, & Reisman, 2009).

El problema de ruteo de vehículos, es uno de los problemas más estudiados en el campo de la optimización, ya que este comparte características similares a otras problemáticas que existen en el mundo real.

VRP Star-case: es donde un vehículo puede hacer varios viajes para satisfacer la demanda del cliente y que el vehículo solo puede visitar a un cliente en cada uno de sus viajes.

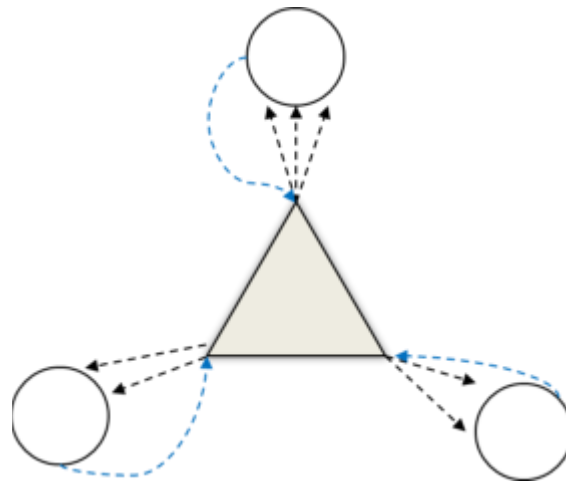


Figura 2.2: Problema VRP Star-case

Problemas del VRP con ventanas de tiempo

El VRPTW se refiere al enrutamiento óptimo de una flota de vehículos entre un depósito y un número de clientes que deben ser visitados dentro de un intervalo de tiempo especificado, llamado una ventana de tiempo, si el vehículo llega fuera de esta ventana de tiempo, es decir, llega antes o después de los límites establecidos se tendrá que pagar un costo adicional por no cumplir con

dicho intervalo de tiempo, a esto se le suele llamar penalización.

Consiste en encontrar una colección exacta de circuitos simples un mínimo costo que cumpla con lo siguiente, cada circuito visita el depósito, cada cliente antes de tiempo.

Su objetivo de minimizar el costo total, ya sea distancia, número de vehículos, etc., pero sobre todo el tiempo de espera necesario para abastecer a todos los clientes respetando las ventanas de tiempo. Es necesario conocer la ventana de tiempo, es decir, llega antes o después de los límites establecidos se tendrá que pagar un costo adicional por no cumplir con dicho intervalo de tiempo, a esto se le suele llamar penalización.

Consiste en encontrar una colección exacta de circuitos simples un mínimo costo que cumpla con lo siguiente, cada circuito vi tiempo de cada uno de los clientes, el momento en el que se comienzan las rutas, el tiempo necesario para viajar de un cliente a otro y para servir a cada uno de ellos.

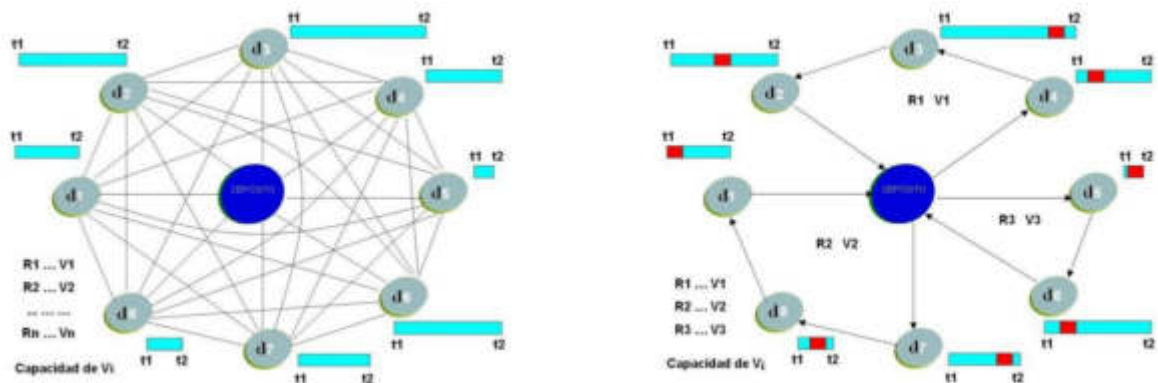


Figura 2.3: Problema con ventanas de tiempo

A continuación en la Figura 2.4 se muestra un desglosado de autores con uti-

lización de herramientas con la finalidad de buscar una solución a nuestro problema.

2.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA EL VRP

Para el problema de ruteo existen diferentes métodos de solución, se pueden catalogar en tres clases: métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas. (Laporte G., 2007).

2.2.1 MÉTODOS EXACTOS

Este tipo de métodos de solución, parten de una formulación como modelos de programación lineal (enteros) o similares, y llegan a una solución factible (entera) gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles.

2.2.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

El término heurística proviene del griego “heuriskein”, que significa encontrar o descubrir, se usan para resolver problemas de optimización a través de la aproximación intuitiva, este tipo de solución son utilizado cuando no existe un algoritmo exacto que proporcione una solución o cuando las restricciones del problema son difíciles de modelar (Díaz, Glover, & Ghaziri, 1996).

Las heurísticas se dividen en:

- **Constructiva**, es la solución factible se va generando de manera constructiva paso a paso.

| | Daineshzandi, 2011) & (Soveren & Schatkeat - 2013 | Lau, Chan, Tsui, & Pang, 2010) & (Salhi, Imran, & Wessan, 2014 | Cacchiari, Hemmelmayr, & Tronzo, 2014 | Bolduc, Laporte, Renaud, & Boucher, 2010 | Allahverdiroo, Chow & Bocker, 2014 | Saura, & Ochi, 2012 | MaX, 2010 | Yuyun, Jafri, & Jeng, 2013 | Till, Faiz, & Krachan, 2014 | Murrukes & Marmak 1988 | Subramana, Vaz Perna 1988 | Luis Infante 2012 |
|---|---|--|---------------------------------------|--|------------------------------------|---------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| Más de lo que su capacidad de carga | ✓ | | | | | | | | | | ✓ | |
| Clientes y los depósitos se encuentran mezclados | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | |
| Visitado una o más veces durante un periodo de tiempo establecido. | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | |
| Entrega dividida por la distribución a un cliente es superior a uno | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | | |
| Estocástico (carácter aleatorio) | ✓ | | | | ✓ | | | | | ✓ | | |
| Inconforme con la mercancía entregada | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | | | | |
| Intervalo de tiempo | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ |
| Distribución mixta | | | | | | | | | | ✓ | | |
| Capacidad de los vehículos es limitada | ✓ | | | | | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| Vehículo no está obligado a regresar al depósito | ✓ | | | | | | | | | | | |
| Flota mixta | ✓ | | | | | | | | | ✓ | | |
| Dificultad para establecer demandas, tiempos de recorrido y ubicación de los clientes desconocido | | | | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | |
| Solo una visita a un depósito y regreso | | | | | | | | | | | | ✓ |

Figura 2.4: Autores con el uso del VRP

- **De mejora o búsqueda local**, es una solución factible se hace una mejora de la misma o una búsqueda que arranca precisamente con esta solución, llamada generalmente como solución inicial.
- **De relajación**, son métodos asociados a la programación lineal entera, los cuales generan una solución factible mediante la relajación de la naturaleza de las variables para encontrar cotas del problema.

2.2.3 METAHEURÍSTICAS

Son una familia de algoritmos que se derivan de las heurísticas, buscan una solución aproximada al problema sin necesidad de recorrer todo el espacio de búsqueda, son consideradas para aquellos problemas que por su complejidad o por la falta de información sobre el tipo de problemas no existe un algoritmo que lo resuelva, los llamados problemas NP, algunas son inspiradas en la observación de la naturaleza.

Las metaheurísticas tenemos: algoritmo de colonia de hormigas, programación restringida, recocido simulado, algoritmos genéticos, búsqueda tabú y redes neuronales. Estos algoritmos realizan una exploración más profunda en el espacio de búsqueda y por consiguiente requieren un mayor tiempo computacional para brindar una solución.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo, se describe el problema con la formulación matemática propuesta, así como también se detalla las características del problema, las variables y parámetros.

3.1 PROGRAMACIÓN LINEAL- OPTIMIZACIÓN

La programación lineal es una técnica matemática, que consiste en una serie de métodos y procedimientos que permiten resolver problemas de optimización en cualquier tipo de rama dentro de la industria.

George Dantzig (1974) fue el fundador de la Programación Lineal (PL), desarrolló el método simplex un algoritmo inteligente que busca la solución óptima entre un conjunto muy reducido de alternativas e indica paso a paso un procedimiento para resolver el problema que se propone en la programación lineal, por otra parte Narendra Karmarkar (1984), encontró un algoritmo, llamado algoritmo de Karmarkar, que es más rápido que el método simplex en ciertos casos.

La programación lineal son técnicas de optimización en las que los problemas que representan un proceso se pueden caracterizar como ecuaciones lineales. La naturaleza lineal del conjunto de igualdades hacen de esta técnica una

herramienta ampliamente utilizada y sobretodo muy efectiva para la resolución de problemas en los que se desea sacar el mayor provecho de alguna situación. Algunas aplicaciones comunes que han sido resueltos con la ayuda de la programación lineal son:

- Asignación de rutas adecuadas a diferentes depósitos.
- Encontrar un patrón de distribución entre plantas y almacenes que minimicen los costos aun con las limitaciones de capacidad.
- Selección de productos que se harán en etapas posteriores, aprovechando los recursos existentes y precios actuales para maximizar el rendimiento de las ganancias.

Al momento de representar modelos matemáticos, existen variables, ecuaciones para un solo problema y la solución no sólo consiste en encontrar los puntos que satisfagan al mismo, sino brindar la solución que proporcionen valores óptimos para la función objetivo, con la finalidad de proporcionar modelos destinados a la asignación eficiente de los recursos limitados en actividades conocidas y cuenta con el objetivo de satisfacer las metas deseadas (maximización o minimización de esos recursos).

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Un conjunto de clientes debe ser abastecido mediante un centro de distribución, teniendo la obligación de cumplir con las diferentes demandas impuestas por cada uno de ellos. El viaje que se realizará es desde el centro de distribución hacia el cliente, se tiene que considerar las opciones de rutas que existen, tomando en cuenta los tipos carreteras, esto implica diversos requisitos dependiendo del tipo de vehículo que circulen por estas.

Existen dos tipos de vehículos, los doblemente articulados y los sencillos, estos último deben de ser contratados por un externo, ambos vehículos cuentan

con diferentes capacidades desiguales por ende desiguales costos operativos. Solamente pueden visitar un cliente y deben regresar al centro de distribución. El objetivo es minimizar los costos de viajes a cada cliente sin importar la ruta o el vehículo así como también la renta de cada vehículo.

Algunos supuestos que se manejan para nuestro problema son:

- Cada vehículo solo puede visitar a un centro de distribución.
- El vehículo regresa por el mismo camino seleccionado.
- Cuentan con tiempo de entrega.
- Los vehículos cuentan con limitante de tiempo de uso.
- Los vehículos deben de regresar a su localización inicial.
- Cuentan con rutas alternas.
- Los recorridos de los vehículos puede ser representado como una ruta.
- Costos de permisos.

3.3 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El uso de modelos matemáticos para la representación de un problema es muy usado en la investigación de operaciones ya que provee muchas ventajas. Por mencionar algunas se tiene que el uso de los modelos matemáticos:

- Permite obtener un mejor conocimiento del problema.
- Permite una descripción concisa del problema lo cual hace más comprensible la estructura de este.
- A partir del modelo se suele ver con claridad los datos que son importantes para el problema.
- Para las instancias pequeñas es posible en muchos casos resolverlos con el uso de paquetes computacionales. Esto permite obtener una idea del comportamiento del problema en este tipo de instancias.

Por otro lado, existen también algunas desventajas que deben mencionarse:

- Se tiene que un modelo es por definición una idealización abstracta del problema, es decir, que el modelo es una simplificación del problema real implicando ciertas suposiciones que deben justificarse.

Por lo tanto se debe tener cuidado que el modelo sea una representación lo más apegada posible al problema real.

A continuación se presentará la formulación del problema como un modelo de programación lineal entera. Para la modelación se tomó como base el modelo presentado por Luis Infante.

Conjuntos

I : Clientes

J : Número de viaje

K : Vehículos

R : Rutas

Parámetros

J_k Número de viaje con el vehículo k

C_{rik} Costo del viaje redonde del depósito hacia el cliente i con el vehículo k por la ruta r

q_{rk} Capacidad del vehículo k

t_{rik} Tiempo de viaje del depósito hacia el cliente i con el vehículo k por el camino r

t_{sik} Tiempo de servicio del viaje j con el vehículo k por el camino r

Variables

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si el vehículo } k \text{ visita al cliente } i \text{ por el ruta } r \text{ en su viaje } j \\ 0, & \text{Si no.} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{Si se usa el vehículo } k \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

$$\min \sum_r \sum_i \sum_k C_{ikr} x_{ijkr} + \sum_K f_k y_k \quad (3.1)$$

$$\sum_r \sum_i x_{ijkr} = 1, \quad \forall j \in k, \quad (3.2)$$

$$\sum_r \sum_i \sum_j q_k x_{ijkr} \geq d_i, \quad \forall i \neq 0 \quad (3.3)$$

$$\sum_r \sum_i \sum_j x_{ijkr} \leq y_k |J|, \quad \forall k, \quad (3.4)$$

$$\sum_r \sum_i \sum_j t_{ikr} x_{ijkr} \leq TM_k, \quad \forall k, \quad (3.5)$$

$$x_{ijkr}, y_k \in \{0, 1\} \quad (3.6)$$

Donde (3.1) es la función objetivo la cual minimiza el costo de viaje a cada cliente considerando el costo de renta, si es vehículo propio el $f_k=0$. En cuanto a las restricciones, en la (3.2) es la asignación de viaje, en cada viaje solo se visita un cliente o se queda en el depósito, para la (3.3) son para todas las entregas que se realicen al cliente deben de cumplir con la demanda, la (3.4) es la cantidad de viajes que se permiten a todos los vehículos y (3.5) es la cantidad de viajes que se permiten a todos los vehículos. Finalizamos con las variables (3.6).

EXPERIMENTACIÓN

Con el objetivo de evaluar el desempeño de la metodología de solución diseñada en este trabajo, se realizó experimento computacional que se utilizó para resolver el modelo matemático y se finalizará con la explicación de la experimentación con los datos reales de la empresa del caso de estudio.

4.1 SOFTWARE- GUROBI

El optimizador de Gurobi es un programa de solución de optimización comercial para programación lineal (LP), programación cuadrática (QP), programación cuadrática restringida (QCP), programación lineal de enteros mixtos (MILP), programación cuadrática de enteros mixtos (MIQP) y cuadratura de enteros mixtos Programación restringida (MIQCP).

El optimizador de Gurobi es compatible con una variedad de lenguajes de programación y modelado que incluyen:

- Interfaces orientadas a objetos para C ++ , Java , .NET y Python
- Interfaces orientadas a matrices para C , MATLAB y R
- Enlaces a lenguajes de modelado estándar: AIMMS , AMPL , GAMS y MPL
- Enlaces a Excel a través de sus Analítica Solver y SDK Solver productos

El optimizador de Gurobi también incluye una serie de características para apoyar la creación de modelos de optimización, incluido el soporte para:

- Múltiples objetivos con flexibilidad en la forma en que se priorizan.
- Las restricciones generales, tales como MIN / MAX, ABS, AND / OR, y las restricciones de los indicadores ayudan a evitar tener que convertir las restricciones comunes en restricciones lineales
- Modelos con funciones objetivas convexas, lineales por partes, para capturar ciertos problemas no lineales
- Funciones objetivas arbitrarias lineales por partes, para que sea más fácil expresar esta característica de modelado común
- Sintonización distribuida, para acelerar la exploración de ajustes de parámetros para acelerar los tiempos de resolución.

4.2 EXPERIMENTACIÓN

Este estudio computacional consistió en realizar instancias de tres tipos, la primera instancia fue incrementar el número de clientes con menos vehículos, la segunda instancia fue incrementar el número de vehículos para menos clientes y para finalizar mismo número de clientes y vehículos.

4.3 DEFINICIÓN DE INSTANCIAS

Para la validación del modelo se definieron 3 tipos de instancias del problema propuesto.

- *A* son instancias pequeñas, con respecto a los datos de clientes (*i*), vehículos (*k*) y rutas (*r*)

- B son instancias medianas, con respecto a los datos de clientes (i), vehículos (k) y rutas (r)
- C son instancias grandes, con respecto a los datos de clientes (i), vehículos (k) y rutas (r)

4.4 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Se realizó una experimentación preliminar, esto con la finalidad de probar si el modelo matemático propuesto es factible para el caso de estudio, para probar esto se utilizó datos semejantes a los datos reales y se ejecutó una prueba preliminar.

En la tabla 4.1, se muestran los datos de la experimentación, en la primera columna podemos observar los tipos de instancias que se definieron anteriormente, en las próximas 3 columnas, se muestran nuestros conjuntos definidos en nuestro modelo matemático y en las últimas dos columnas están nuestros parámetros.

| Tipo de instancia | $- I -$ (Clientes) | $- K -$ (Vehículos) | $- R -$ (Rutas) | qk | di |
|-------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------------|
| A | 2 | 2 | 3 | 100, 70 | 250, 450 |
| B | 4 | 6 | 3 | 80, 80, 80, 40, 40, 40 | 30, 100, 35 |
| C | 6 | 2 | 4 | 80, 40 | 30, 100, 100, 20, 35, 75 |

Tabla 4.1: Instancia preliminar

Se realizó la experimentación preliminar con el software Gurobi y un equipo de cómputo de 16 GB RAM, un CPU de cuatro núcleos a 2.5ghz, brindándonos el siguiente resultado.

| Tipo de instancia | <i>Tiempo computo</i> | <i>Función Objetivo</i> | <i>Vehículo propio</i> | <i>Vehículo rentado</i> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| A | 0.35 | 15,500 | 1 | 1 |
| B | 0.068 | 4,360 | 4 | 0 |
| C | 0.038 | 9,480 | 0 | 2 |

Tabla 4.2: Resultado de la instancia preliminar

En primera instancia se puede observar que los resultados brindados cumplen con la función objetivo del problema, encontrando la ruta con el menor costo considerando parámetros que actualmente la empresa del caso de estudio no considera, así como también nos arroja un tiempo tránsito menor, beneficiando al problema.

4.5 CASO DE ESTUDIO

Una vez validada la factibilidad del modelo matemático, se empezó a ejecutar la experimentación con los datos reales del caso.

De cada instancia se ejecutaron aproximadamente 10 instancias, esto con la finalidad de observar el comportamiento del modelo.

En la primera instancia, estamos comparando 3 instancias con el incremento de valores en los clientes, número de vehículos y las demandas a cumplir..

| Tipo de instancia | $- I -$ (Clientes) | $- K -$ (Vehículos) | $- R -$ (Rutas) | q_k | d_i |
|-------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|--|----------------------------|
| A | 2 | 3 | 2 | 25 20 15 | 20 10 |
| B | 6 | 7 | 6 | 50 60 40 30 60 60 80 | 120 130 200 600 700 900 |
| C | 3 | 10 | 4 | 14500 13500 16500 18500 19500 20000 21000 25000 30000 25000 | 150 250 350 |

Tabla 4.3: Instancia 1- Caso práctico

Se ejecutó la instancia en el programa y la solución brindada fue la siguiente:

| Tipo de instancia | <i>Tiempo computo</i> | <i>Función Objetivo</i> | <i>Vehículo propio</i> | <i>Vehículo rentado</i> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| A | 0.04 | 5,500 | 0 | 4 |
| B | 417.02 | 137,000 | 1 | 0 |
| C | 473.408 | 49,000 | 0 | 1 |

Tabla 4.4: Resultado instancia 1- Caso práctico

Las tres instancias nos arrojan una solución óptima, debido al cumplimiento de la función objetivo, así como también la satisfacción de los clientes cumpliendo las demandas impuestas por ellos.

Ahora vamos a incrementar el número de clientes y de vehículos, para ver el comportamiento del modelo.

| Tipo de instancia | $-I-$ (Clientes) | $-K-$ (Vehiculos) | $-R-$ (Rutas) | qk | di |
|-------------------|---------------------|----------------------|------------------|--|---|
| A | 4 | 2 | 4 | 30 25 | 10 20 15 18 |
| B | 5 | 10 | 6 | 50 60 45 55 43 25 50 | 50 50 25 70 90 |
| C | 15 | 10 | 4 | 25 25 50 50 40 40 60 60 70 70 | 900 600 300 400 500 600 800 250 550 650 890 780 550 650 780 |

Tabla 4.5: Instancia 2- Caso práctico

En la segunda instancia nos arroja que para la instancia C, no es una óptima solución, esto debido a que son muchos clientes y el tiempo de entrega, lo cual lo estamos considerando como un parámetro es este caso es muy limitado, por esta instancia no se cumple el objetivo. Es importante mencionar, que si el tiempo de entrega se aumenta esta función si se cumple. Por otra parte, para las otras instancias A y B, se cumplió con el objetivo así como también la demanda real satisfecha.

| Tipo de instancia | <i>Tiempo computo</i> | <i>Función Objetivo</i> | <i>Vehículo propio</i> | <i>Vehículo rentado</i> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| A | 0.67 | 2,300 | 1 | 1 |
| B | 97.087 | 22,200 | 0 | 1 |
| C | 600.376 | 398,500 | 0 | 6 |

Tabla 4.6: Resultado instancia 2- Caso práctico

Por último, una tercera instancia, donde las tres variables de incrementan.

| Tipo de instancia | $-I-$ (Clientes) | $-K-$ (Vehiculos) | $-R-$ (Rutas) | qk | di |
|-------------------|---------------------|----------------------|------------------|----------------------------------|---|
| A | 4 | 4 | 3 | 20 15 25 30 | 5 10 15 8 |
| B | 7 | 7 | 3 | 50 60 45 55 43 25 50 | 100 140 150 280 430 200 300 |
| C | 13 | 9 | 4 | 50 50 30 45 25 25 75 85 75 | 150 250 350 450 550 350 650 450 750 660 950 750 650 |

Tabla 4.7: Instancia 3- Caso práctico

En la tercer instancia nos arroja que para la instancia B y C, no son una óptima solución, debido al tiempo de entrega. La única que es factible es la A se cumple con el objetivo así como también la demanda real satisfecha.

| Tipo de instancia | <i>Tiempo computo</i> | <i>Función Objetivo</i> | <i>Vehículo propio</i> | <i>Vehículo rentado</i> |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| A | .17 | 9,200 | 3 | 1 |
| B | 600.08 | 123,400 | 3 | 3 |
| C | 600.183 | 230,800 | 4 | 5 |

Tabla 4.8: Resultado instancia 3- Caso práctico

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

En este capítulo se presenta las conclusiones de esta investigación sobre los resultados obtenidos en el capítulo de experimentación, así como también las contribuciones que brindó y el trabajo a futuro.

En esta investigación se puede concluir que la utilización de la investigación de operaciones resultar conveniente para brindar la una solución factible dada por Cplex para el problema de VRP Starcase.

A través de la experimentación se mostró que las instancias con un perfil basado al tamaño del caso se estudió (la cantidad de cliente es mayor a los vehículos así como la demanda), por lo que las soluciones ofrecidas por el solver están más cerca de la solución óptima global que la estimación dada por el solver Cplex.

Esta solución cumplió con el objetivo propuesto que era minimizar los costos del ruteo de transporte, y analizando las rutas con ciertas variables que en la actualidad la empresa del caso de estudio no contemplaba.

Adicional con este trabajo también se redujeron los costos, en el caso del sector de transporte de carga, de acuerdo a su estructura de operación, esta reducción se pudo lograr mediante la solución propuesta en este trabajo de investigación

5.1 CONTRIBUCIÓN

En la empresa en la cual se va a trabajar en esta investigación, se dedica a proveer servicios logísticos internacionales, cuenta con presencia en 8 Países (México, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia, Perú Brasil y USA), en cada uno de estos países brinda servicios logísticos, la gestión del transporte (FTL, LTL y Servicios Multimodal), almacenaje, valor agregado, logística internacional y mantenimiento vehicular y con 126 centros operativos, 70 filiales de carga fraccionada y con extensa experiencia en servicios de distribución y almacenamiento, apoyados por la preferencia de +2,500 clientes en diversas industrias.

Para esta empresa del caso de estudio, se logró con el objetivo propuesto, es importante mencionar que esta herramienta no es exclusiva de la empresa del caso de estudio, esto se puede adaptar a las características de la empresa que tenga un problema de ruteo de transporte.

5.2 TRABAJO A FUTURO

Planea visualizar las demás áreas de oportunidad de la empresa para el caso de estudio, con la finalidad de aplicar otras metodologías que se puedan adaptar más al área de oportunidad que tengan.

Se puede analizar la entrega de la mercancía tipo Star-Case, en vez de que sea este tipo de aplicación que sea hacia varios puntos cercanos desde su centro de depósito, con la finalidad de aprovechar la capacidad del vehículo.

Y para finalizar, se puede validar los parámetros de los tiempos con la finalidad de asegurar que se adopte a la realidad.