

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



Instituto de Ciencias Matemáticas

“ANÁLISIS Y DISEÑO DE MEJORAS EN EL PROCESO DE
PLANIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE DOS OPERACIONES EN
UN OPERADOR LOGÍSTICO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL”

**INFORME DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN (dentro de una
materia de la malla)**

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE

Presentado por:

ÁLVAREZ VÉLEZ ANGIE KATHERINE

SISALIMA JIMÉNEZ LEONARDO JAIR

GUAYAQUIL-ECUADOR

2012

Agradecimiento

El mayor de los agradecimientos a nuestro creador Dios que nos bendice día a día.

Agradezco a mis padres que me brindaron su apoyo incondicional y a mis profesores que participaron de manera activa en nuestra formación académica, así como al ingeniero Guillermo Alejandro Baquerizo coordinador de la carrera, que siempre estuvo al tanto del éxito de este proyecto, agradezco a la empresa por la proporción de datos necesarios para realizar este proyecto y por último a mi compañera de tesis que más que una amiga supo darme ese consejo que necesité en el transcurso del presente proyecto.

A mis amigos, a todos y cada uno de ellos, por estar ahí siempre, en los buenos y malos momentos.

Leonardo Jair Sisalima Jiménez

Agradecimiento

Agradezco primero a Dios por iluminarme día a día en el camino de mi vida universitaria, a mi familia, a mis profesores en general entre ellos el ingeniero Baquerizo por demostrar la preocupación e interés al realizar poco a poco este proyecto, al ingeniero Erwin Delgado por la confianza, amistad y enseñanza que supo brindarme, y al ingeniero Pablo Álvarez por enseñarme que pase lo que pase hay que defender la verdad y la justicia ante todo. Agradezco a mi compañero de Tesis Jair Sisalima por esa patadita de confianza que supo darme en el momento perfecto.

Angie Katherine Álvarez Vélez

Dedicatoria

Dedico este trabajo en especial a mis padres y hermanos, que fueron la inspiración en cada momento de este trabajo y a mi enamorada que me brindó su apoyo incondicional en el presente proyecto.

Leonardo Jair Sisalima Jiménez

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi mamá y mi abuelita que me ha brindado todo el apoyo que se necesita, a mi papá que de una u otra manera se ha preocupado e interesado en mi crecimiento a nivel profesional, a mis hermanos que son el ejemplo a seguir día a día, a mis sobrinos para algún día apoyarlos como lo hicieron conmigo y a los scouts que han aportado en la enseñanza de valores que se me ha inculcado.

Especialmente para ti Gabriela, que junto con Dios siempre estas protegiéndome.

Angie Katherine Álvarez Vélez

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”
(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Angie Katherine Álvarez Vélez

Leonardo Jair Sisalima Jiménez

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Guillermo Alejandro Baquerizo Palma
DIRECTOR DE PROYECTO DE
GRADUACIÓN (dentro de una materia de la
malla)

Ing. Erwin Joffre Delgado Bravo

DELEGADO DEL ICM

Resumen

La empresa de estudio de este trabajo de graduación es un Operador Logístico de la ciudad de Guayaquil, la cual brinda servicio de transporte a diferentes clientes, entre las cuales se ha considerado dos de ellos para realizar un análisis y diseño de mejoras en el proceso de planificación y distribución del Operador Logístico.

Se establecerán parámetros entre el OPL y el Cliente para tener una mejor relación y dar las responsabilidades a cada una de las partes, luego se procederá a realizar un análisis sobre los costos de transportación, considerando todo lo que esto implica y así mediante un programa matemático se realizará una mejora minimizando dichos costos.

Abstract

The company studied in this work is a ranking Logistics Operator of the city of Guayaquil, which provides transportation services to various clients, which are considered two of them for analysis and design of improvements to the process distribution planning and logistics operator.

Parameters will be established between the OPL and the Customer to have a better relationship and responsibilities to each of the parties, and then proceed to an analysis of the costs of transportation, considering all that this implies and so using mathematical program improvements will be made to minimize these costs.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VI
ABREVIATURAS.....	VII
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.2.1 <i>Análisis de causas</i>	6
1.3 HIPÓTESIS.....	6
1.4 OBJETIVOS.....	7
1.4.1 <i>Objetivos generales</i>	7
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 CÓDIGO DE BUENAS PRÁCTICAS.....	8
2.1.1 <i>Principios</i>	8
2.2 DEFINICIÓN DE RUTEO VEHICULAR	12
2.3 INTRODUCCIÓN AL VRP	12
2.3.1 <i>Problema del ruteo vehicular (VRP)</i>	13
2.3.2 <i>Evolución del VRP</i>	14
2.3.3 <i>Variantes del VRP</i>	17

2.3.3.1	VRPTW (Vehicle Routing Problem-Time Windows).....	17
2.3.3.2	CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem).....	17
2.3.3.3	CVRPTW (Capacitated Vehicle Routing Problem-Time Windows).....	18
2.3.3.4	VRPPD (Vehicle Routing Problem with Pick up and Delivery).....	18
2.3.3.5	IRP (Inventory Routing Problem).....	18
2.3.3.6	MDVRP (Vehicle Routing Problem with Multiple Depot).....	18
2.3.3.7	SDVRP (Split Delivery Vehicle Routing Problem).....	19
2.3.3.8	STOCHASTIC VRP-SVRP.....	19
2.3.3.9	FSMVRPTW (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows).....	19
2.4	MODELO MATEMÁTICO DEL VRP CON VENTANAS DE TIEMPO.....	20
2.4.1	<i>Definición del Modelo Matemático</i>	20
2.4.2	<i>Formulación del problema del ruteo vehicular con ventanas de tiempo</i>	21
2.4.2.1	Restricciones.....	23
2.5	HEURÍSTICAS.....	25
2.5.1	<i>Definición de Heurística</i>	25
2.5.1.1	Algoritmos heurísticos.....	26
2.5.2	<i>Ventajas y Desventajas</i>	27
2.5.2.1	Ventajas.....	27
2.5.2.2	Desventajas.....	27
2.6	DEFINICIÓN DE METAHEURÍSTICA.....	27
2.6.1	Algoritmos metaheurísticos.....	28
2.6.2	<i>Ventajas y desventajas</i>	28
2.6.2.1	Ventajas.....	28
2.6.2.2	Desventajas.....	28
2.6.3	<i>Metaheurística utilizada (Búsqueda Tabú)</i>	29
2.6.3.1	Introducción.....	29

2.6.3.2	Esquema	30
3	CASO APLICACIÓN	32
3.1	INTRODUCCIÓN	32
3.2	DISEÑO DE PARÁMETROS REQUERIDOS PARA MEJORAR LA RELACIÓN ENTRE OPL-CLIENTE	32
3.3	ANÁLISIS DE LOS COSTOS DE DISTRIBUCIÓN.....	37
3.3.1	<i>Costos de Transporte</i>	37
3.3.1.1	Objetivos del Negocio	38
3.3.1.2	Elementos que intervienen en los costos operacionales	38
3.3.1.3	Inversión.....	39
3.3.1.4	Estructura básica de los costos de flota	40
3.3.1.5	Análisis de los Costos del Operador Logístico.....	40
3.4	CASO DE ESTUDIO	44
3.4.1	<i>Flujo de información</i>	44
3.4.2	<i>Obtención de datos</i>	45
3.5	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PARA EL CASO ESTUDIO CVRPTW	51
3.5.1	<i>Solución Inicial</i>	51
3.5.2	<i>Asignación del costo de una solución</i>	52
3.5.3	<i>Función Intercambio</i>	52
3.5.4	<i>Lista de candidatos</i>	53
3.5.5	<i>Función llamada “memoriapos”</i>	54
3.5.6	<i>Función “Actualiza”</i>	54
3.5.7	<i>Función Tabu Search</i>	55
3.5.8	<i>Solución del Tabu Search con Intensificación + Diversificación</i>	57
3.6	RESULTADOS COMPUTACIONALES	59

4	ANÁLISIS DE RESULTADOS BASADO EN EL CASO DE APLICACIÓN.....	61
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
5.1	CONCLUSIONES.....	63
5.2	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-I Gastos fijos	41
Tabla 3-II Gastos Variables: Consumo de Combustible	41
Tabla 3-III Gastos Variables: Consumo de llantas	42
Tabla 3-IV Gastos Variables: Consumo de Lubricantes	42
Tabla 3-V Gastos Variables: Consumo de Filtros	43
Tabla 3-VI Distancia entre clientes OP1 (km)	46
Tabla 3-VII Distancia entre clientes de OP2 (km)	47
Tabla 3-VIII Ventanas horarias de OP2	48
Tabla 3-IX Ventanas Horarias de OP1	48
Tabla 3-X Demanda de OP1 (kg).....	49
Tabla 3-XI Demanda de OP2 (kg).....	49
Tabla 3-XII Tiempo recorrido entre clientes de OP1 (min)	49
Tabla 3-XIII Tiempo recorrido entre clientes de OP2 (min)	50
Tabla 3-XIV Solución inicial OP1	55
Tabla 3-XV Solución inicial de OP2	56
Tabla 3-XVI Solución con intensificación de OP1	57
Tabla 3-XVII Solución con intensificación de OP2	57
Tabla 3-XVIII Solución con Intensificación y diversificación de OP1	57
Tabla 3-XIX Solución con Intensificación y Diversificación de OP2	58
Tabla 3-XX Tiempo de ejecución de la función Tabu search de OP1	59
Tabla 3-XXI Tiempo de ejecución de la función Tabu search de OP1	60
Tabla 4-I Análisis de resultados de OP1	61
Tabla 4-II Análisis de resultados de OP2	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1 Diagrama causa y efecto	6
Ilustración 2-1 TSP (Problema del agente viajero).....	14
Ilustración 2-2 M-TSP (Multi Depot-Problema del agente viajero)	15
Ilustración 2-3 VRP (Vehicle Routing Problem)	16
Ilustración 3-1 Flujo de información	44
Ilustración 3-2 Solución inicial de OP1.....	56
Ilustración 3-3 Solución final de OP1	58

ABREVIATURAS

M: Número total de vehículos

N: Número total de clientes

Q: Capacidad máxima de vehículos

v_i : Cliente i , donde $i = 1, 2, \dots, N$.

d_i : Demanda del cliente v_i , donde $i = 1, 2, \dots, N$

v_0 : Depósito.

c_{ij} : Costo asociado al arco dirigido entre el cliente v_i y el cliente v_j

t_{ij} : Tiempo de viaje entre el cliente v_i y el cliente v_j

t_{v_i} : Tiempo de arribo al cliente v_i

e_{v_i} : Limite inferior de la ventana de tiempo del cliente v_i

l_{v_i} : Limite superior de la ventana de tiempo del cliente v_i

s_{v_i} : Tiempo de servicio del cliente v_i

w_{v_i} : Tiempo de espera del cliente v_i

VIII

$E_s(0, v_i)$: Arcos de salida del depósito hacia el cliente v_i

$E_v(u_i, 0)$: Arcos de llegada desde el cliente v_i hacia el depósito

$E_c(v_i, v_j)$: Arcos de interconexión entre el cliente v_i y el cliente v_j

r : Máxima longitud de recorrido de ruta

INTRODUCCIÓN

Todos los días se entregan productos en diferentes puntos de una ciudad, teniendo como referencia un origen que es el punto de distribución. Uno de los objetivos de los distribuidores es determinar el número de vehículos que se requieren para la entrega de bienes a los clientes con el objetivo de minimizar el costo de transporte.

Actualmente en Ecuador todo el concepto logístico todavía no está tecnificado en cada uno de los canales que conlleva este tema, es decir ruteo, sistemas de información, integración, etc.

En este sentido, cada vez son más conscientes de la importancia de la gestión del área de distribución (y la gestión logística en general) como parte esencial a la hora de aportar más valor a sus clientes y reducir sus costos. Sin embargo, es poca la utilización de modelos matemáticos a la hora del diseño de rutas, más bien se lo opera de forma empírica o con el mecanismo determinado a través del tiempo.

Se debe aclarar que los métodos antes mencionados por las organizaciones actualmente han generado utilidades a las mismas por dicha razón no se arriesgan a implementar algo ajeno a lo antes utilizado.

De esta forma, la resolución de los problemas de distribución se convierte en una de las más notables en la investigación de operaciones ya que la reducción de una pequeña parte de los costos operativos puede reflejarse en enormes ahorros económicos e impactar en factores medioambientales, además de incrementar la satisfacción del cliente.

Entonces una planificación del diseño de rutas puede generar ahorros entre el 10% y el 20% en los costos de transportación. Por lo general estos problemas son difíciles de resolver ya que en la práctica el número de clientes es grande y no se resolvería en tiempo polinomial.

CAPÍTULO 1

1. Descripción del problema

1.1 Antecedentes

La empresa donde se realizará este trabajo de graduación es un operador logístico que consta de 10 camiones, el cual brinda servicios de transporte a diferentes tipos de clientes (operaciones), por motivos de privacidad se denominará OPL a la empresa y OP1, OP2 a las dos operaciones que en este proyecto serán el caso a estudiar para implantar un cambio en sus procedimientos.

Uno de los problemas a plantear es que no existen parámetros bien definidos entre OPL-Cliente donde establezcan las responsabilidades entre partes, y esto genera grandes inconvenientes ya que al momento de realizar las rutas han existido falencias como pérdida de mercadería, estado de calles, entregas incompletas, cambio a última hora de rutas por parte del cliente o por OPL, pérdida de tiempo por disponibilidad del cliente, y son temas que al momento de reflejarlo en las utilidades se arman conflictos para definir en ese instante las responsabilidades.

Así mismo se encuentra la deficiencia en la selección del Transporte, ya que no se está considerando los costos de transportación que esto implica. Esto significa que al momento de realizar la asignación para una ruta definida no se considera peso, volumen, horarios de la misma y en muchas ocasiones esto conlleva a la subcontratación táctica de un tercero en la operación, y muchas veces no es lo más conveniente para el OPL.

Para la culminación del proyecto se tiene el diseño de rutas ya que se la determina de forma empírica, la cual hace que genere variación día a día y no existan rutas definidas, por ejemplo en la operación OP2 estableció el cliente que los recorridos de las rutas empezarían en las primeras horas del día, todos los días el cliente le da una programación de la cantidad de camiones y choferes que necesita para el siguiente día, en ese momento planifican la ruta intuitivamente y midiendo distancias en la mente determina el problema de ruteo de ese día, como se puede notar no es una manera muy eficiente de realizar dicho proceso e incluso hay ocasiones en el que el cliente le informa al chofer de que manera puede realizar la ruta si este así lo desea.

1.2 Justificación del Problema

En una empresa multinacional donde se maneja diferentes tipos de procesos, entre ellos asignación y distribución, es necesario planificar antes de realizar cualquier operación.

En el Ecuador dichos procesos no están tan avanzados como en otros países ya sea por la tecnología utilizada, la cultura, entre otros; es así que es necesario dar un paso adelante para crecer como empresa y a nivel nacional.

Eso se logrará mediante parámetros definidos antes de concretar las operaciones, así mismo tener una selección adecuada de transporte a la mercadería y tiempo de la operación, y por último una vez resuelto los inconvenientes anteriores, se hará mucho más fácil resolver el problema de ruteo, y a su vez minimizar los costos de operación, analizando los resultados mediante gráficos donde se ilustrarán las nuevas rutas comparándolas con las que están actualmente.

1.2.1 Análisis de causas¹

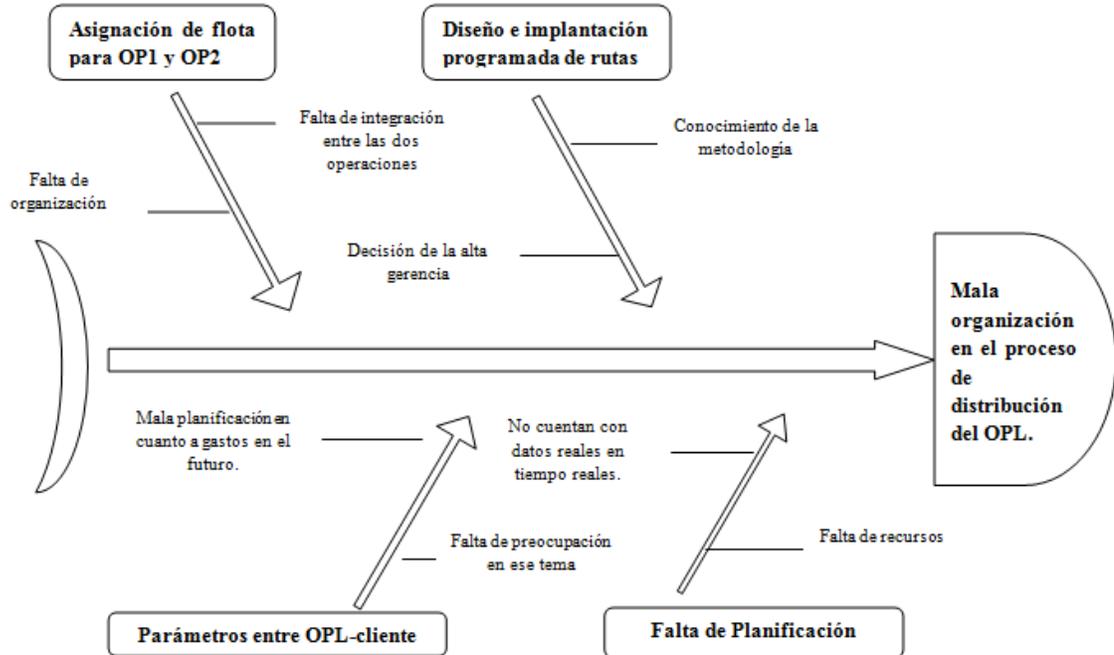


Ilustración 1-1 Diagrama causa y efecto

1.3 Hipótesis

Plantear los parámetros entre el Operador-Cliente, realizar la adecuada asignación del Transporte de acuerdo a la Operación y establecer las rutas en la distribución tanto de OP1 como de OP2, ayudará en la obtención de un cambio positivo en las utilidades de la empresa.

¹ Diagrama causa-efecto propuesto por Kaoru Ishikawa para analizar las diferentes causas y subcausas frente a un problema.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos generales

Utilizar herramientas estratégicas y matemáticas para el análisis y diseño de mejora de dos de las operaciones que maneja el operador logístico, con el fin de minimizar costos de transportación y tiempos de viajes.

1.4.2 Objetivos específicos

- Mejorar la rentabilidad y la capacidad operativa del operador.
- Contrastar y minimizar los costos de operación.
- Diseñar rutas que ayuden a disminuir los tiempos de viajes.
- Establecer parámetros entre el operador logístico y el cliente para establecer las responsabilidades entre ambas entidades.
- Realizar la selección del transporte mediante una programación matemática tomando en cuenta los tiempos de operación de los mismos.

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico

2.1 Código de buenas prácticas

Este tipo de operaciones deben tener una regulación de referencia para garantizar el desarrollo futuro de la misma esta puede ser de dos formas:

- Regulación por la administración pública a través de leyes y reglamentos.
- Autorregulación por las empresas que operan en el mercado.

2.1.1 Principios

Principio de Independencia

El operador logístico no se verá afectado por relaciones o intereses que puedan comprometer su capacidad para decidir y actuar respecto a empleados, proveedores, clientes y comunidad en general.

Principio de respeto a las normas de la libre competencia

El cumplimiento de este principio supone que el operador logístico deberá tener libertad a la hora de llevar a cabo su actividad y el cliente libertad a la hora de

elegir entre uno u otro operador, sin que intervengan fuerzas distintas a las del mercado que puedan imponer condiciones en las relaciones de intercambio.

Principio de sostenibilidad

Este principio recoge la necesidad de que el operador logístico se constituya con el objetivo de ser rentable y sostenible en el tiempo. Sólo de esta manera, el operador logístico se mantendrá en el mercado.

Principio de establecimiento de estándares de servicio

El operador logístico deberá definir los atributos correspondientes a cada servicio, generando una responsabilidad para él mismo y una referencia al cliente para demandar su cumplimiento.

Principio de compromiso de calidad

El operador logístico deberá identificar, aceptar y satisfacer las expectativas y necesidades que los grupos de interés relacionados con él - clientes, proveedores, empleados, accionistas y comunidad - tienen sobre los servicios que ofrece.

Principio de dignificación de la subcontratación

El operador logístico se obligará a definir mecanismos para garantizar el buen entendimiento con los agentes subcontratados bajo criterios de máximo respeto a las reglas y normas que rigen la actividad.

Principio de cumplimiento de las normas laborales y mercantiles

El operador logístico ha de observar el estricto cumplimiento de las normas laborales y mercantiles que afectan a su actividad, con el objetivo de velar por la legalidad y ética en el sector.

Principio de cobertura de riesgos y responsabilidades

El operador logístico tomará medidas con el objetivo de hacer frente ante terceros por cualquier tipo de anomalía en el servicio, ya sea por acciones u omisiones atribuibles a la actividad propia del operador.

Principio de respeto al medio ambiente

El operador logístico y sus clientes deben ser conscientes de sus compromisos con el medio ambiente y con la sociedad, por lo que han de considerar a éstos tanto dentro y fuera de sus ámbitos de actividad, atendiendo al impacto que en aquellos puedan producir.

Principio de cumplimiento a los criterios de prevención de riesgos laborales, salubridad y seguridad

El operador logístico deberá cumplir todos los requisitos inherentes a la normativa en materia de prevención de riesgos laborales, de salubridad y de seguridad.

Principio de transparencia

El operador logístico fomentará la transparencia en todos los niveles de la organización y hacia el resto de agentes con los que interactúa: clientes, proveedores, empleados, accionistas y comunidad en general.

Principio de confidencialidad

El operador logístico valorará de forma específica la necesidad de confidencialidad de los datos relativos a sus clientes y proveedores.

Principio de autocontrol

Someter las conductas, prácticas o estrategias de la actividad del operador logístico al conjunto de principios anteriores y aceptar que a la luz de las mismas aquellas puedan ser consideradas objetivamente conformes o disconformes con las exigencias de la buena fe y los buenos usos mercantiles.

2.2 Definición de Ruteo vehicular

Se puede definir ruteo vehicular:

- Uno o más vehículos deben, desde una (o varias) bodega(s), visitar n clientes para luego volver a su punto de salida.
- Cada cliente debe ser visitado sólo una vez, y la distancia (o costo) total debe ser lo más corta posible.
- C_{ij} representa la distancia (o costo) entre el cliente i y el j .

2.3 Introducción al VRP

El VRP aparece naturalmente como un problema central en transporte, distribución y logística y pertenece a la clase de problemas NP-difíciles quiere decir que no se conocen algoritmos “eficientes” para su solución exacta. Ha sido estudiado por cerca de 50 años y en la actualidad para el diseño de rutas se utilizan sistemas computarizados.

A menudo, conducen a ahorros de entre 5% y 20% de los costos de producción.

El VRP es la intersección de dos problemas fundamentales:

- Traveling Salesman Problem (TSP): El TSP constituye la situación general y de partida para formular otros problemas combinatorios más

complejos, aunque más prácticos, como el ruteo de vehículos y la programación de tareas dependientes del tiempo de alistamiento. En el TSP se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera, no se distinguiría de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones temporales.[2]

- Bin Packing Problem (BPP): El problema consiste en embalar un conjunto de objetos en varias cajas o contenedores tal que el peso o el volumen total no exceda un valor máximo de las cajas. De una manera precisa, definimos un problema de empaquetamiento en compartimentos (BPP, bin packing problem) como sigue. Tenemos un conjunto finito de artículos e cada uno de los cuales tienen un peso w y una restricción de precedencia entre estos, incurriendo en un costo c_{ij} (tal vez infinito). Posteriormente definimos un grupo ordenado para ser un subconjunto de artículos de modo que el peso total del grupo pedido no exceda la capacidad de la caja y ningún costo entre los artículos adyacentes en el grupo sea infinito.[2]

2.3.1 Problema del ruteo vehicular (VRP)

El problema del enrutamiento de vehículos o VRP (Vehicle Routing Problem) se podría decir que es una evolución del problema del viajero o TSP (Travelling

Salesman Problem). Este problema consiste en servir una serie de clientes ubicados geográficamente de manera dispersa, para atender los clientes se cuenta con una flota de vehículos que parten desde un depósito central, el problema consiste en asignar a cada vehículo una ruta de clientes, de manera que se minimice la distancia recorrida y visite todos los clientes una sola vez.[2]

2.3.2 Evolución del VRP

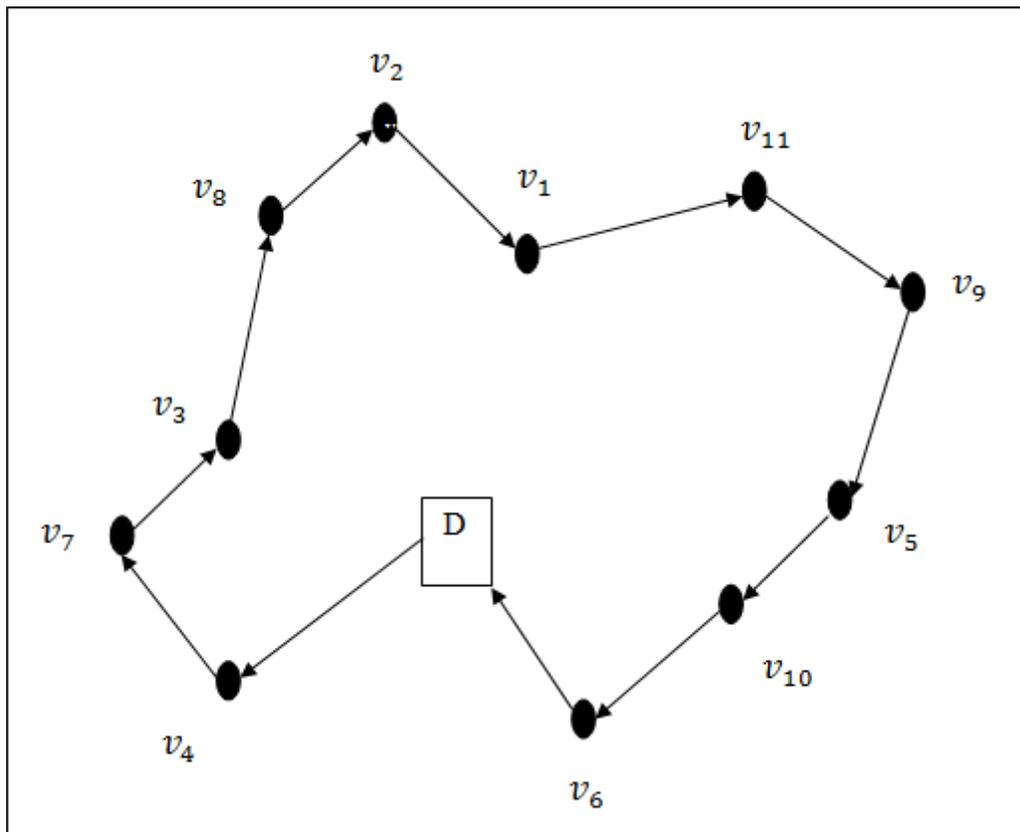


Ilustración 2-1 TSP (Problema del agente viajero)

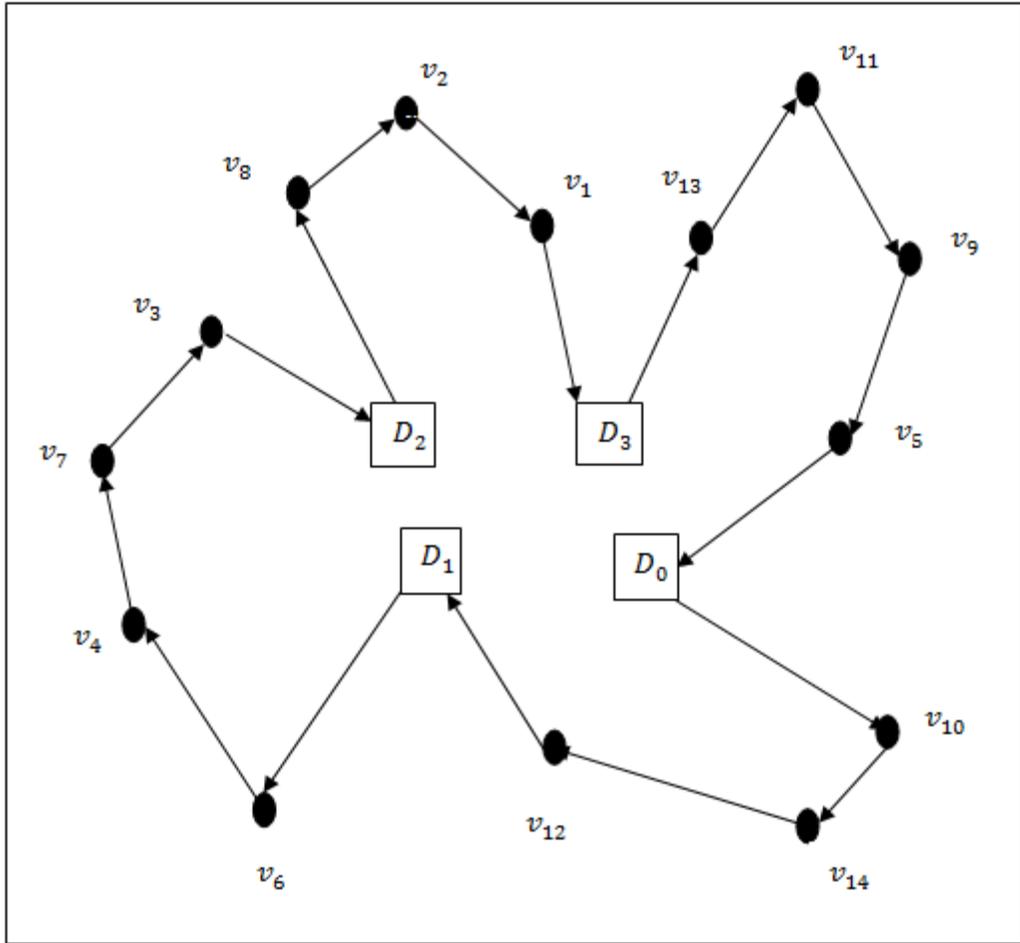


Ilustración 2-2 M-TSP (Multi Depot-Problema del agente viajero)

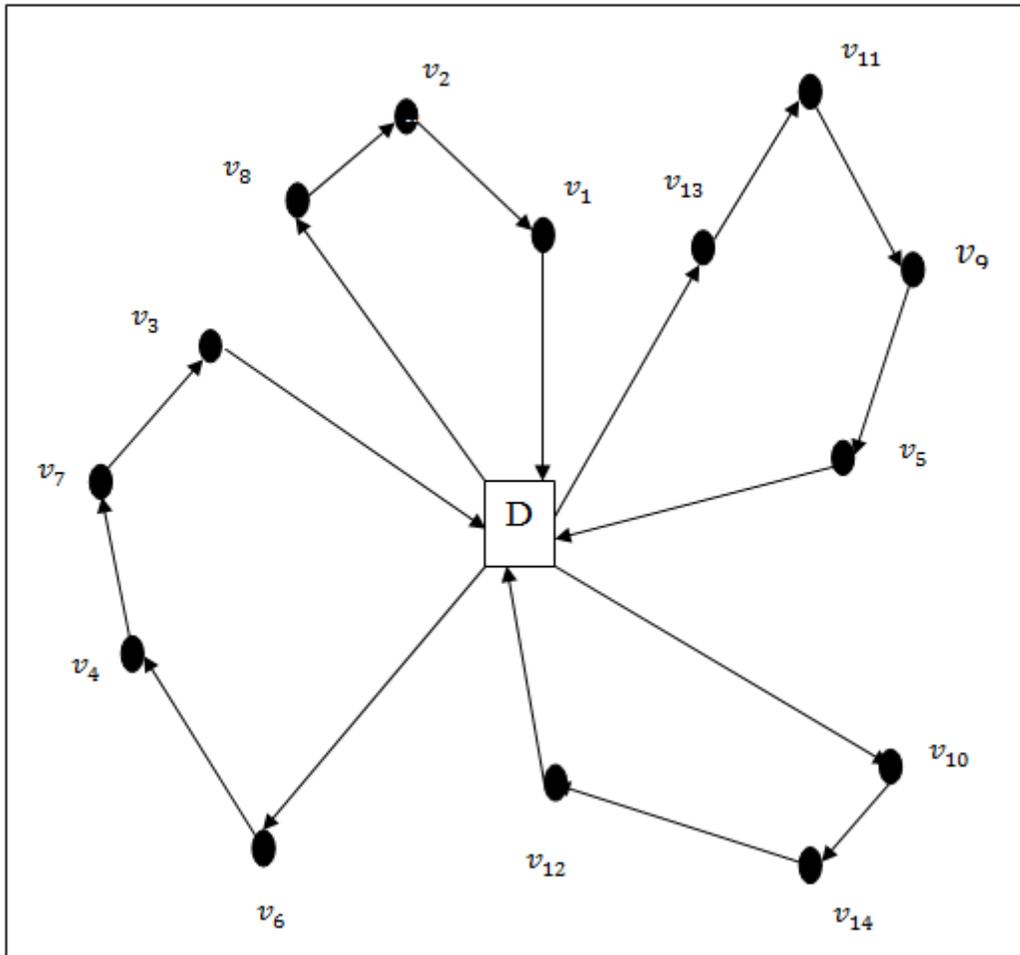


Ilustración 2-3 VRP (Vehicle Routing Problem)

2.3.3 Variantes del VRP

2.3.3.1 VRPTW (Vehicle Routing Problem-Time Windows)

Se debe encontrar la ruta óptima teniendo en cuenta que cada cliente tiene una ventana horaria [Hora inicio, Hora Fin], y los vehículos solo pueden arribar donde los clientes en el rango de tiempo.

Existen dos tipos de ventanas de tiempo:

- Duras: Especifican para cada cliente un espacio de tiempo en el que forzosamente debe ser visitado.
- Suaves: Especifican un tiempo en el que el cliente debería ser visitado y una función de costo para retrasos o adelantos (penalizaciones en la función objetivo).

2.3.3.2 CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem)

Se tiene un conjunto de camiones, y cada uno tiene una capacidad. Entonces se debe encontrar la ruta óptima, recolectando la mercancía de los clientes sin exceder la capacidad del camión.

2.3.3.3 CVRPTW (Capacitated Vehicle Routing Problem-Time Windows)

Es en el que se va a trabajar y para determinar la ruta óptima, teniendo en cuenta la capacidad del camión y las ventanas horarias de los clientes.

2.3.3.4 VRPPD (Vehicle Routing Problem with Pick up and Delivery)

Se debe encontrar la ruta óptima con la posibilidad de recoger (devoluciones) y entregar mercancía.

2.3.3.5 IRP (Inventory Routing Problem)

Un almacén central con capacidad ilimitada sirve a un conjunto de clientes con cierta demanda fija. El objetivo es resolver un VRP asignando y determinando sus cargas para reponer inventario de los detallistas al mínimo costo de transporte e inventario.

2.3.3.6 MDVRP (Vehicle Routing Problem with Multiple Depot)

En este caso se tienen múltiples depósitos para atender a los clientes, por ende para este problema se necesita asignar a qué clientes atiende cada depósito, así como la flota designada a cada depósito.

2.3.3.7 SDVRP (Split Delivery Vehicle Routing Problem)

Para este caso se considera una relajación del problema, en donde se permite que un mismo cliente pueda ser servido por diversos vehículos si se reducen los costos totales de operación.

2.3.3.8 STOCHASTIC VRP-SVRP

En esta variante del VRP se considera que algunos de los componentes son estocásticos, como pueden ser:

- Clientes Estocásticos: Esto significa que cada cliente está presente con una probabilidad p y ausente con una probabilidad de $1-p$.
- Demandas Estocásticas: La demanda de cada cliente es una variable aleatoria.
- Tiempos Estocásticos: Los tiempos de servicio y los tiempos de viaje son variables aleatorias.

2.3.3.9 FSMVRPTW (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows)

Es raro encontrar que los vehículos de una flota tengan la misma capacidad, por eso en este caso se considera que los vehículos sean diferentes en cuanto

equipo, capacidad de carga, costo por su estructura, y costos de mantenimiento, y además se considera que cada cliente tenga una ventana horaria.

2.4 Modelo Matemático del VRP con ventanas de tiempo

2.4.1 Definición del Modelo Matemático

Una vez definido el problema del tomador de decisiones, la siguiente etapa consiste reformularlo de manera conveniente para su análisis. La forma convencional en que la investigación de operaciones logra este objetivo es mediante la construcción de un modelo matemático que represente la esencia del problema.

Los modelos matemáticos están expresados en términos de símbolos y expresiones matemáticas y está conformado por sistemas de ecuaciones relacionadas que describen la esencia del problema.

De esta forma, si se deben tomarse n decisiones cuantificables relacionadas entre sí, se representan como **variables de decisión** X_1, X_2, \dots, X_N para las que se deben determinar los valores respectivos. En consecuencia, la medida de desempeño adecuada (por ejemplo la ganancia) se expresa como una función matemática de estas variables de decisión por ejemplo $z=3X_1+2X_2+\dots+5X_N$, esta función se llama **función objetivo**. También se expresan en términos

matemáticos todas las limitaciones que se pueden impone sobre los valores de las variables de decisión, casi siempre en forma de ecuaciones o desigualdades como $X_1 + 3X_1X_2 + 2X_2 \leq 10$. Con frecuencia, tales expresiones matemáticas de las limitaciones reciben el nombre de **restricciones**.

Las constantes, los coeficientes o el lado derecho de las ecuaciones de las restricciones y de la función objetivo se llaman **parámetros** del modelo. El modelo matemático puede expresarse entonces como el problema de elegir los valores de las variables de decisión de manera que se maximice/minimice la función objetivo, sujeta a restricciones dadas.

2.4.2 Formulación del problema del ruteo vehicular con ventanas de tiempo

Un grafo dirigido $G = (V, E)$ con

$$V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad E = \{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V, v_i \neq v_j\}$$

Y un vector de costos $c \in R^E$ (también: tiempos de desplazamientos)

El nodo v_0 representa el depósito y tiene asociada una capacidad m (número de vehículos) [3]

Los nodos v_1, v_2, \dots, v_n representan clientes y tienen asociadas demandas d_1, d_2, \dots, d_n y tiempos de servicio.

El VRPTW consiste en la construcción de un conjunto de a lo mucho M rutas que satisfagan las siguientes restricciones:

- Cada ruta comienza y termina en el depósito.
- Cada cliente es visitado una y sólo una vez por cada un solo vehículo.
- La demanda de cada cliente se satisface en cada visita.
- Los clientes son atendidos dentro de las ventanas de tiempo.
- La demanda total no excede la capacidad Q de cada vehículo.

Se puede definir la siguiente variable binaria

$$X_{ijm} \begin{cases} 1, & \text{si el arco } (v_i, v_j) \in E \text{ es considerado en la ruta de un vehículo } m \in M \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Función objetivo está asociada a la suma de todos los costos asociados a los arcos que pertenecen a una solución dada.

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{(v_i, v_j) \in E} c_{ij} x_{ijm}$$

2.4.2.1 Restricciones

La primera condición que debe cumplirse es que luego de visitar un vehículo a un cliente $v_i \in V \setminus \{v_0\}$, este debe visitar a uno y solamente a un cliente o al depósito [3].

$$\sum_{m \in M} \sum_{v_j \in \Delta^-(v_i)} x_{ijm} = 1, \forall v_i \in V \setminus \{v_0\}$$

De igual forma, cada recorrido realizado por un vehículo $m \in M$ debe terminar en el depósito v_0 .

$$\sum_{v_i \in \Delta^+(v_0)} x_{i0m} = 1, \forall m \in M$$

De la misma manera, después de visitar sólo una vez a cada cliente $v_i \in V \setminus \{v_0\}$, el vehículo debe dirigirse, a un solo vértice $v_j \in V$.

$$\sum_{v_j \in \Delta^+(v_i)} x_{ijm} - \sum_{v_j \in \Delta^-(v_i)} x_{jim} = 0, \forall m \in M, \forall v_i \in V \setminus \{v_0\}$$

La suma de las demandas asociadas a los clientes que son satisfechas por la visita de un vehículo $m \in M$, no puede superar la capacidad Q del mismo.

$$\sum_{v_i \in V \setminus \{v_0\}} d_i \sum_{v_j \in \Delta^+(v_i)} X_{ijm} \leq Q, \forall m \in M$$

Sea t_{v_i} el tiempo de llegada del vehículo a un cliente v_i , entonces se debe cumplir con los intervalos de tiempo para cada cliente $[e_{v_i}, l_{v_i}]$.

$$e_{v_i} \leq t_{v_i} \leq l_{v_i}, \forall v_i \in V \setminus \{v_0\}$$

Donde S_{v_i} se define como el tiempo de servicio del cliente $v_i \in V \setminus \{v_0\}$

Se define la función de tiempo modificada

$$\tilde{t}_{v_i, v_j} = \begin{cases} t_{ij} + S_{v_i}, & \text{si } v_i \in V \setminus \{v_0\} \\ t_{ij}, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Asimismo, se define al par ordenado de clientes (v_i, v_j) como compatibles, si algún vehículo $m \in M$ puede visitar v_j inmediatamente después de v_i , es decir

$$X_{ijm} (t_{v_i} + \tilde{t}_{v_i, v_j} - t_{v_j}) \leq 0, \forall (v_i, v_j) \in E, v_i, v_j \neq v_0$$

Ya que no es lineal esta ecuación se tendrá que linealizar, para ello se utilizará el método *Big N*.

$$t_{v_j} - t_{v_i} \geq S_i + t_{ij}N(1 - X_{ijm}), \forall m \in M$$

Debido a que el problema del VRPTW es NP- Duro, es decir no puede resolverse en tiempo polinomial se ha desarrollado diversas heurísticas que proveen buenas soluciones para el desarrollo del este tipo de problemas.

2.5 Heurísticas

2.5.1 Definición de Heurística

Para la mayoría de problemas de interés no existe un algoritmo exacto con complejidad polinómica que encuentre la solución óptima a dicho problema. Además, la cardinalidad del espacio de búsqueda de estos problemas suele ser muy grande, lo cual hace inviable el uso de algoritmos exactos ya que la cantidad de tiempo que necesitaría para encontrar una solución es inaceptable. Debido a estos dos motivos, se necesita utilizar algoritmos aproximados o heurísticos que permitan obtener una solución de calidad en un tiempo razonable. El término heurística proviene del vocablo griego *heuriskein*, que puede traducirse como encontrar, descubrir o hallar.

Algunas definiciones más interesantes que se encuentran en la literatura son:

Russell: "Actualmente, el término heurística se utiliza más bien como adjetivo para referirse a cualquier técnica que permita mejorar el desempeño del caso

promedio en una tarea de resolución de problemas, aunque no necesariamente permita mejorar el desempeño del peor de los casos. Específicamente en el área de los algoritmos de búsqueda, se refiere a una función mediante la cual se obtiene una estimación del costo de una solución”.

Rich: “Una función heurística es una correspondencia entre las descripciones de los estados del problema hacia alguna medida de idoneidad, normalmente representada por números. Los aspectos del problema que se consideran, cómo se evalúan estos aspectos y los pesos que se dan a los aspectos individuales, se eligen de forma que el valor que la función da a un nodo del proceso de búsqueda sea una estimación tan buena como sea posible para ver si ese nodo pertenece a la ruta que conduce a la solución”.

Se puede concluir que una heurística es un procedimiento basado en el sentido común, que se supone que obtendrán una buena solución a problemas difíciles de un modo sencillo y rápido.

2.5.1.1 Algoritmos heurísticos

Algunos algoritmos heurísticos:

- Algoritmo Clark & Wright
- Algoritmo de Barrido
- Algoritmo del vecino más cercano.

2.5.1.1.1 Algoritmo del vecino más cercano.

Paso 1: Sea $S = V \setminus \{0\}$. Sea $i^* \in V$ tal que $c_{0i^*} = \text{Min}c_{0i} \forall i \in S$;

Paso 2: Escoger el cliente $j^* \in S$ tal que $c_{i^*j^*} = \text{Min}c_{ij}$. Haga $S = S \setminus \{j^*\}$ y $i^* = j^*$

Paso 3: Si $S \neq \emptyset$, volver al paso 2. Si no, Fin.

2.5.2 Ventajas y Desventajas

2.5.2.1 Ventajas

- Costo computacional relativamente bajo.
- Se ajustan a diversas restricciones.

2.5.2.2 Desventajas

- Exploran un conjunto limitado de soluciones factibles.
- Enfrascarse en un óptimo local.

2.6 Definición de Metaheurística

Es un método de solución general que proporciona tanto una estructura general como criterios estratégicos para desarrollar un método heurístico específico que se ajuste a un tipo particular de problema. La metaheurística se ha convertido en

una de las técnicas más importantes del paquete de herramientas que utilizan los profesionales de la IO [4].

2.6.1 Algoritmos metaheurísticos

Algunos algoritmos metaheurísticos:

- Búsqueda Tabú
- Recocido Simulado
- Algoritmo genético

2.6.2 Ventajas y desventajas

2.6.2.1 Ventajas

- Búsqueda profunda.
- Generan soluciones de muy buena calidad.

2.6.2.2 Desventajas

- Costo computacional elevado con respecto a las heurísticas.
- Aplicados a casos específicos.

2.6.3 Metaheurística utilizada (Búsqueda Tabú)

2.6.3.1 Introducción

El término Búsqueda Tabú (Tabu Search -TS) fue introducido en 1986 por Fred Glover en el mismo artículo que introdujo el término metaheurística. Los principios fundamentales de la búsqueda fueron elaborados en una serie de artículos a finales de los años 80 y principios de los 90, que fueron luego unificados en el libro "Tabu Search" en 1997. El destacado éxito de la búsqueda tabú para resolver problemas de optimización duros, especialmente aquellos que surgen en aplicaciones del mundo real, ha causado una explosión de nuevas aplicaciones durante los últimos años.

La búsqueda tabú es una metaheurística que guía un procedimiento heurístico de búsqueda local en la búsqueda de optimalidad global. Su filosofía se basa en derivar y explotar una colección de estrategias inteligentes para la resolución de problemas, basadas en procedimientos implícitos y explícitos de aprendizaje.[4]

La búsqueda tabú es una Metaheurística muy usada que utiliza algunas ideas de sentido común para permitir que el proceso de búsqueda escape de un óptimo local.

2.6.3.2 Esquema

Cualquier aplicación de la búsqueda tabú incluye como una subrutina algún procedimiento de búsqueda local que parezca apropiado para el problema bajo consideración. Un procedimiento de búsqueda local opera como un procedimiento de mejora local excepto que no requiere que cada nueva solución de prueba sea mejor que la solución de prueba anterior)

El proceso comienza con este procedimiento como un procedimiento de mejora local de la manera usual (es decir, al aceptar sólo una solución mejorada en cada iteración) para encontrar un óptimo local.

Una estrategia de la búsqueda tabú es que continúa la búsqueda pero permite movimientos sin mejora hacia las mejores soluciones en la vecindad del óptimo local. Una vez que se alcanza un punto en el que se pueden encontrar mejores soluciones en la vecindad de la solución de prueba, se aplica de nuevo el procedimiento de mejora local para encontrar un nuevo óptimo local.

El peligro de este enfoque es que después de dejar un óptimo local, el proceso se puede ciclar y regresar al mismo óptimo local. Par evitar este círculo vicioso, la búsqueda tabú prohíbe en forma temporal los movimientos que pudieran regresar el proceso, a una solución visitada recientemente.

Una lista tabú registra estos movimientos prohibidos, los cuales se conocen como movimientos tabú.

Existen conceptos avanzados como la intensificación, que implica la exploración de una parte de la región factible con más intensidad de la usual para encontrar en ella muy buenas soluciones, y la diversificación que implica forzar la búsqueda entrando en áreas de la región factible que no se han explorado con anterioridad, para implantar estos conceptos se utiliza la memoria a largo plazo [4].

CAPÍTULO 3

3 Caso Aplicación

3.1 Introducción

Este capítulo se divide en dos partes, antes de implementar la metodología para el diseño de rutas primero se debe atacar el problema de raíz, como ya lo hemos planteado en el análisis de causa-efecto. En la primera parte se comenzará planteando algunos puntos para la buena coordinación entre OPL-Cliente para lograr una mayor eficiencia, por dicha razón este paso no debe verse como una función aislada, sino como un proceso primordial en toda relación entre dos partes en este caso la de OPL-cliente.

3.2 Diseño de parámetros requeridos para mejorar la relación entre OPL-cliente

Se debe tener claro que la confianza y la integridad son esenciales en una economía de libre mercado. Las empresas deberán proyectar estos valores hacia los clientes, proveedores, empleados, etc.

Entre un Operador Logístico y el cliente deben existir parámetros para poder compartir responsabilidades y manejar la operación de manera conjunta.

A continuación se definirán 10 principios básicos para que se tenga una mejor relación OPL-Cliente.

1. Principio de Procedimiento

- El camión es cargado durante la madrugada para poder salir el día siguiente a realizar la ruta.
- La ruta es realizada con un ayudante proporcionado por el cliente para verificar la constancia de la entrega.

2. Principio de Información

- Ofrecer la información suficiente a clientes actuales y potenciales acerca de las características del servicio prestado por el operador y las tarifas aplicadas.
- El Operador Logístico deberá capacitar a sus trabajadores sobre la empresa a la que se brindará el servicio, conocer los cuidados del producto, las reglas impuestas, el proceso a seguir, etc.

3. Principio de Confidencialidad

- No se deberá difundir información confidencial tanto del Operador como del Cliente a personas o entidades ajenas a la operación.
- El Cliente no deberá compartir la información de tarifas a otras empresas, ni descuentos, promociones, etc.

4. Principio de Cumplimiento

- El camión deberá estar la noche anterior para poder ser cargado durante la madrugada.
- Al día siguiente en la hora pactada para el comienzo de ruta el chofer deberá estar puntual y el camión ya debe de tener toda la carga completa para realizar la entregar.

5. Principio de Presentación

- Los camiones tendrán que llegar limpios a las bodegas correspondientes, para poder cargar y no tener inconvenientes con la carga.
- Tanto el chofer y el ayudante por parte del Cliente deberán estar de una manera presentable, y equipados para realizar la ruta respectiva.

6. Principio de Tiempo

- Cumplir con los tiempos establecidos tanto para el Operador como para el cliente, es decir al comienzo de la ruta, durante y al final de la misma.

7. Principio de Responsabilidades

- Si existiese alguna pérdida durante la ruta, la responsabilidad será compartida, Chofer-Ayudante.

- Si existiese un robo se tendrán dos enfoques del mismo:
 - ✓ Si el robo es por descuido de las personas involucradas, se descontará parte del sueldo de las mismas por el valor de la mercancía perdida
 - ✓ Caso contrario se analizará el tema con el Operador y el Cliente para llegar a una mejor resolución.

8. Principio de Permisos

- El camión deberá estar debidamente legalizado con todos los papeles al día, si llegase a ser detenido por alguna autoridad y éste tiene carga del cliente, será netamente responsabilidad del Operador.
- Si la documentación del producto no está completa o errónea y llegase a tener inconvenientes con alguna autoridad, será netamente responsabilidad del Cliente.

9. Principio de Entrega.

- Si al momento de ir al lugar de destino, el cliente no recibe el producto se deberá analizar el caso por el cual no lo recibe y determinar responsabilidades como:

- ✓ Si la carga llegó en mal estado por consecuencia del viaje, esa ruta no será tomada en cuenta al momento de la facturación del Operador.
- ✓ Si la carga está incompleta o no es lo que el cliente solicitó, ese viaje será cobrado por el Operador así no se haya realizado la entrega.
- ✓ Caso contrario a los anteriores, se realizará una reunión entre ambas partes para definir responsabilidades.

10. Principio de Facturación.

- El reporte de facturación tendrá que ser enviado al cliente por quincena (viernes), una vez enviado al cliente a más tardar martes de la siguiente semana deberá ser validado para que el Operador pueda realizar la respectiva facturación, si no se cumplen los días pactados de acuerdo al proceso, en la siguiente facturación habrá un descuento del 2% a favor de que sí lo cumplió.
- Una vez realizada la factura se tendrá un plazo de quince días para que esta sea cancelada, caso contrario no se realizará ninguna ruta hasta que no se realice el pago.

Cualquier incumplimiento de alguno de los principios establecidos, será sancionado por el 1.5% del total de la facturación de la ruta. Si los incumplimientos por cualquiera de las dos partes continúan, la empresa afectada podrá terminar el contrato si así lo desea.

3.3 Análisis de los costos de Distribución

Los costos de distribución incurren desde el momento que se obtiene el pedido hasta que este se convierta en efectivo, llevando a cabo varias partes donde tenemos:

- Gastos de obtención de pedidos: Gastos de personal
- Gastos de personal de oficina
- Gastos de transporte: comprenden los costos de llevar la mercancía hasta los diferentes tipos de clientes incurren los gastos de créditos y cobranzas, también incluyen los gastos de empaque y embarque. Los costos de transportación se dividen en gastos fijos y variables.

3.3.1 Costos de Transporte

Para analizar los costos de transporte es necesario mencionar algunos puntos que ayudarán a tener una mejor visión para realizar un análisis de la situación.

3.3.1.1 Objetivos del Negocio

- Uno de los objetivos principales de la empresa es la maximización del rendimiento de los activos de la misma.
- Así mismo la minimización de los costos operativos, mantenimiento, etc.

3.3.1.2 Elementos que intervienen en los costos operacionales

Partiendo de: $\text{Precio} = \text{Costo} + \text{utilidad}$

Podemos fijar los criterios básicos:

- Identificación de los costos.
- Costos Fijos, establecidos por vehículos \$/día, constituyen parte del costo fijo total de la empresa atribuible a un día de operación por cada vehículo de transporte.
- Costos Variables Unitarios, son los costos que varían de acuerdo a las condiciones de operación y se establecen por \$/km.
- Costos Cuasi Variables, son costos que aunque no son fijos, varían, pero no en consideración de las condiciones de operación, ni en función directa del kilometraje recorrido, sino de factores, como por ejemplo, los peajes, las labores de carga y descarga, etc. Este costo se establece en \$/viaje.
- Utilidad como rendimiento esperado:

De la inversión en activos fijos.

El activo total neto.

Además de los costos antes mencionados, es conveniente resaltar que existen elementos normalmente desapercibidos que influyen en la determinación del precio del transporte como:

- La duración y distancia real del servicio,
- Estado y geografía de la ruta,
- Porcentaje de utilización del camión.
- Los días de operación.
- La utilización total de la flota.

3.3.1.3 Inversión

Para los inicios de una empresa de transporte, la inversión está compuesta por:

Activos Fijos

- Vehículos de transporte, (camiones, etc.)
- Equipos, (máquinas de mano de obra, herramientas mecánicas, eléctricas, etc.)
- Inmuebles, (terrenos, infraestructura, instalaciones, etc.)

3.3.1.4 Estructura básica de los costos de flota

Podemos sintetizarlos en:

- Costos operacionales.
- Costos Administrativos.
- Costos de ventas.
- Costos Financieros y
- Otros costos.

En todos los casos es necesario analizar los costos, según la clasificación como Costos variables, Costos fijos o Costos Cuasi Variables.

3.3.1.5 Análisis de los Costos del Operador Logístico

Como se mencionó anteriormente se deben identificar los gastos fijos y variables de la operación.

Entre los costos fijos se tiene:

Mediante esta tabla se puede determinar el gasto fijo diario que se genera en las rutas, a esto se le debe añadir \$10 que se le da al conductor por los viáticos del día, es decir la empresa tiene un costo diario de \$89. Este valor es de suma importancia al momento de presentar una tarifa al cliente.

Rubro		Vehículos nuevos
Camión		Cabezal y tráiler 9 Ton
Fijo		
Chasis	compra	\$65,968
Furgón	compra	0
(a) Chasis + Furgón	al año [V.U. 5 años]	\$13,194
(b) Matrícula	al año	\$137
(c) Seguro	Al año (4%)	\$2,639
Baterías	compra	\$170
(d) Batería	al año [V.U. 1 año]	\$381
Sueldo Chofer	mensual	\$450
(e) Sueldo Chofer	al año	\$5,400
(f) Lavado	48 lavados al año	\$384
(g) Mantenimiento anual	4% chasis + furgón	\$2,639
Costo anual (a+b+c+d+e+f+g)		\$24,773
Costo diario		\$79
Días de operación (semanales)	6	

Tabla 3-I Gastos fijos

Precio del diesel (\$/galón)	\$ 0.9259
	Hino
CARGA (TM)	9 Ton
Rendimiento (Km/galón)	12.7
TERRENO PLANO	\$ 0.073 / Km
	Hino
CARGA (T)	9 Ton
Rendimiento (Km/galón)	12.00
PISTA CON GRADIENTE MEDIANA	\$ 0.077 / Km
	Hino
CARGA (T)	9 Ton
Rendimiento (Km/galón)	11.81
PISTA CON GRADIENTE PRONUNCIADA	\$ 0.078 / Km

Tabla 3-II Gastos Variables: Consumo de Combustible

RENDIMIENTO POR LLANTA	53,000.00 Km.
	Hino
CARGA (TNL)	9 Ton
Desgaste 6 llantas (USD / mensual)	172.0
CARRETERA MAL ESTADO	\$ 0.016 / Km
	Hino
CARGA (TNL)	9 Ton
Desgaste 10 llantas (USD / mensual)	135.0
CARRETERA BUEN ESTADO	\$ 0.013 / Km

Tabla 3-III Gastos Variables: Consumo de llantas

ACEITES	Hino
	9 Ton
Aceite motor extra dutty sae 15w40 13tbn	
Precio * Galón	\$ 8.50
Consumo (galón/km)	11 gls/6000 Km
A pagar	\$ 0.016 / Km
	Hino
	9 Ton
Aceite caja ugl80w-90	
Precio * Galón	\$ 8.45
Consumo (galón/km)	6 gls/40000 Km
A pagar	\$ 0.001 / Km
	Hino
	9 Ton
Aceite transmisión 85w140	
Precio * Galón	\$ 9.00
Consumo (galón/km)	5 gls/40000 Km
A pagar	\$ 0.001 / Km
	Hino
	9 Ton
Aceite dirección hydraulic iso 68	
Precio * Galón	\$ 7.50
Consumo (galón/km)	1gl/100000 Km
A pagar	\$ 0.0001 / Km

Tabla 3-IV Gastos Variables: Consumo de Lubricantes

FILTROS	Hino
FILTRO ACEITE	9 Ton
PRECIO	\$ 47.00
Consumo / Km	1cd/ 6000 Km
A PAGAR	\$ 0.0078 / Km
	Hino
FILTRO DE COMBUSTIBLE	9 Ton
PRECIO	\$ 18.50
Consumo / Km	1cd / 6000 km
A PAGAR	\$ 0.0031 / Km
	Hino
FILTRO DE AGUA	9 Ton
PRECIO	\$ 14.00
Consumo / mes	1cd / 2 meses
A PAGAR	\$ 0.0007 / Km
	Hino
FILTRO RACOR	9 Ton
PRECIO	\$ 40.00
Consumo / mes	1cd / 40000 Km
A PAGAR	\$ 0.0010 / Km
	Hino
FILTRO DE AIRE	9 Ton
PRECIO	\$ 98.00
Consumo / mes	1cd / 54000 Km
A PAGAR	\$ 0.0018 / Km

Tabla 3-V Gastos Variables: Consumo de Filtros

A estos costos tanto fijos como variables consideramos un valor extra por algún arreglo o trabajo que se deba realizar para mejorar la operación.

3.4 Caso de estudio

Primero se presentará un flujo de información indicándose como se transmite la información entre OPL-Cliente, luego se tiene la obtención de datos, para poder reflejar las distancias obtenidas entre cliente y así mismo realizar el ruteo y selección respectiva.

3.4.1 Flujo de información

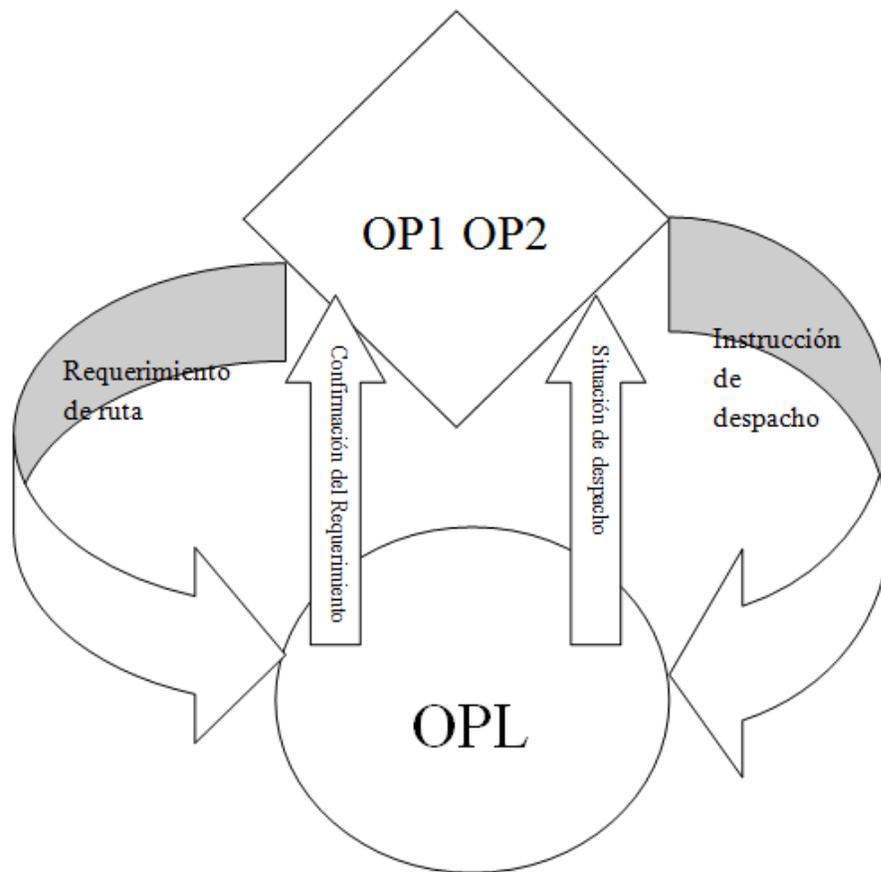


Ilustración 3-1 Flujo de información

3.4.2 Obtención de datos

Para comenzar fue necesario conocer las distancias entre clientes, la cual se obtuvo mediante Google Maps² que utilizó distancias reales entre punto y punto. Como se ilustra en la tabla 3.6 están designadas las diferentes distancias entre Centro de Distribución (que para el caso práctico será C1) y 11 clientes de OP1.

Km	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
C1	0	27	20	30	20	25	12	13.5	17.9	21.1	38	27.6
C2	23	0	7.8	5.7	12	8.3	19.7	9.1	1.5	5.1	12.4	6.5
C3	15	8	0	10	13	14	10.6	2.9	9.1	9.8	18.3	12.4
C4	28	5.5	10.3	0	6	3.9	22	13.7	5.6	2.8	9.2	2.7
C5	20	11.2	13.5	5.3	0	1.4	15.4	12.4	8.9	6.4	15.2	15.9
C6	26	8.3	14.5	4	1.8	0	19	13.4	7.1	5.3	13.3	6.8
C7	14	14.7	9.5	21	18	20.4	0	6.6	16	16.7	25	19.2
C8	12.6	9.7	2.4	13.3	11.9	14	10.9	0	9.5	13.2	20.5	14.6

² Servicio gratuito de Google que incorpora servidores de mapas en línea.

C9	17.5	1	7.4	5.2	11.5	7.8	18.9	9.8	0	4.9	12	6
C10	17.5	3.9	9	3	5.9	4.2	18.4	12.2	3.2	0	12.2	6.3
C11	25	12.2	17.2	9.1	19.3	13.9	27	20.5	11.5	12.1	0	3.8
C12	22	6.4	11.4	2.7	15.9	6.7	28	14.6	5.6	5.6	3.6	0

Tabla 3-VI Distancia entre clientes OP1 (km)

Km	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
C 1	0	11.9	9.1	12.8	21.5	26.8	13.2	12.4	11.6	4.8	8.3	3.5	2.9	2.1	2.8
C 2	14.4	0	1.4	1	8	11.6	0.55	1.1	1.5	2.1	2.2	1.8	14.1	1.3	15.8
C 3	7.8	1.7	0	0.60	7.5	11.2	2.5	1.8	3.5	13.8	18.2	11.1	9.5	11.7	10.5
C 4	7.8	0.90	0.60	0	7.7	11.5	1.4	1.9	2.4	1.9	2.1	1.3	15.7	12.7	12.1
C 5	13.4	8.2	7.5	8	0	5.3	8.7	9.3	9.7	16.7	21.1	1.4	12.3	14.6	13.3
C 6	15.8	10.6	1.0	10.5	4.8	0	11.2	11.3	1.3	19.1	23.5	16.5	16.2	1.7	15.7
C 7	13.6	0.60	2	1.8	8.4	11.7	0	0.55	1	20.5	24.2	16.9	14.3	15.2	1.3
C 8	14.4	1.2	1.5	1.4	9	13.4	0.55	0	1.6	15.3	24.5	17.5	10.9	16.2	17.1
C 9	12.9	1.6	3	2.5	9.4	13.2	1	1.6	0	19.9	23.5	16.3	1.4	14.6	16.3
C10	4.5	15.1	13.7	14.2	17.2	20.9	15.5	15.1	14.9	0	1.0	2.3	4.1	2.4	3.2
C11	7.6	1.7	16.4	16.4	2.3	26.4	24.5	24.4	23.8	6.3	0	7.3	9.6	6.5	7.3

C12	3.3	1 4	1 2	12.5	15.5	19.2	14.3	13.4	13.7	3	7.3	0	3.1	1.2	1.8
C13	2.6	1 1	9.7	10.2	13.1	16.7	14.2	1 2	13.4	4.2	9.1	2.5	0	3	1.7
C14	2.9	12.2	11.4	11.7	14.9	18.6	13.9	11.9	13.3	2.9	7.3	1.4	3.1	0	1.2
C15	4.2	11.1	10.4	10.2	13.7	17.5	15.6	13.3	14.9	3.3	7.5	1.4	2.3	1.3	0

Tabla 3-VII Distancia entre clientes de OP2 (km)

A continuación se detallan las ventanas horarias de los clientes que se utilizará en el proyecto de graduación, cabe recalcar que el centro de distribución de ahora en adelante se lo llamará CD no tiene hora de salida ni de llegada, por aquel motivo es que en la tabla 3 el CD no tiene límite en cuanto al tiempo.

Cientes	I	S
C1	0	∞
C2	11	15
C3	8	14
C4	7	11
C5	9	16
C6	11	16
C7	9	14
C8	12	16
C9	7	12
C10	9	13
C11	8	12
C12	10	15
C13	7	11

C14	8	12
C15	7	16

Tabla 3-VIII Ventanas horarias de OP2

Cientes	I	S
C1	0	∞
C2	7	14
C3	7	13
C4	12	19
C5	17	20
C6	15	20
C7	11	17
C8	9	16
C9	10	18
C10	12	18
C11	7	14
C12	9	17

Tabla 3-IX Ventanas Horarias de OP1

Así mismo la demanda de los clientes se muestra a continuación. La demanda de C1 representa la capacidad de los camiones que en esta operación será homogénea, es decir todos los camiones tendrán la capacidad de 9 toneladas, las cuales están convertidas en kilogramos para una mayor ilustración con respecto al peso de los productos entregados a los clientes.

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
9000	2542	4256	969	238	3297.3	1155.8	3540	2543	2940	820	2146

Tabla 3-X Demanda de OP1 (kg)

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
9000	2000	2660	1900	2100	2150	3567	876	1561	1780	2456	3567	4671	2780	989

Tabla 3-XI Demanda de OP2 (kg)

La tabla 3.XII Y 3.XIII ilustra la suma del tiempo en ir de un cliente a otro cliente, el tiempo de descarga, validación de carga y verificación de documentos, estos tres últimos duran alrededor de 40 minutos.

min	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
C1	0	85	60	85	69	60	50	60	75	78	64	65
C2	35	0	55	55	60	56	70	60	51	57	70	57
C3	15	55	0	58	57	60	59	50	65	66	75	72
C4	45	53	68	0	65	47	80	75	60	50	55	55
C5	30	57	58	55	0	48	65	60	65	55	72	60
C6	39	56	59	50	43	0	62	64	57	56	62	59
C7	17	63	56	85	69	71	0	53	72	80	85	75
C8	13	59	50	61	59	62	50	0	70	65	70	67
C9	34	45	60	58	70	55	80	78	0	55	68	58
C10	39	56	70	57	60	55	80	65	55	0	65	60
C11	38	70	80	55	80	65	85	70	65	65	0	50
C12	30	56	75	52	60	58	75	69	56	60	50	0

Tabla 3-XII Tiempo recorrido entre clientes de OP1 (min)

Min	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
C1	0	60	61	63	73	80	65	63	57	55	58	50	49	46	47
C2	22	0	48	75	60	72	44	45	45	82	78	72	75	73	76
C3	17	49	0	45	62	68	50	49	53	73	70	70	68	71	69
C4	18	42	45	0	64	69	45	45	47	76	76	72	71	73	71
C5	30	60	64	64	0	55	62	68	75	80	88	72	75	74	74
C6	33	70	67	67	51	0	70	71	70	82	90	77	75	80	75
C7	23	46	48	47	64	73	0	42	45	75	76	76	72	71	71
C8	30	48	47	46	66	74	42	0	47	78	79	76	71	75	73
C9	20	45	51	49	77	73	46	47	0	76	77	74	72	72	73
C10	12	80	72	74	82	85	73	76	75	0	59	48	52	50	51
C11	16	75	78	75	85	87	80	83	78	50	0	55	56	53	54
C12	9	70	69	69	74	79	72	76	70	47	55	0	47	44	47
C13	5	71	68	67	77	78	70	71	68	51	57	50	0	47	44
C14	8	74	71	70	78	85	70	72	70	51	53	45	48	0	43
C15	10	73	70	69	73	80	72	70	71	50	56	46	45	45	0

Tabla 3-XIII Tiempo recorrido entre clientes de OP2 (min)

3.5 Desarrollo de la metodología para el caso estudio CVRPTW

Como se definió anteriormente en el diseño de rutas será modelado por un CVRPTW, por lo cual para su resolución será un algoritmo basado en la búsqueda Tabú en el software Wolfram Mathematica³ 8, el cual tendrá las siguientes partes:

3.5.1 Solución Inicial

Para una solución inicial se empleará una heurística glotona, que mediante el algoritmo del vecino más cercano se encontrará una solución inicial, considerando capacidad del camión y respetando la hora máxima de llegada a un cliente. Se creó una función para obtener esta solución inicial, llamada CVRPTW.

$$CVRPTW[Distancias, ventana, demanda, tiempo]$$

La solución actual del CVRPTW (OP1) es:

$$\{1,7,5,1,3,4,11,1,9,1,10,1,6,12,1,8,2,1\}$$

La solución actual del CVRPTW (OP2) es:

$$\{1,15,8,1,10,2,1,12,1,14,1,11,3,1,13,1,9,7,1,4,5,6,1\}$$

³ Programa utilizado en áreas científicas, creado por Stephen Wolfram.

3.5.2 Asignación del costo de una solución

Esta función determina el costo asociado a una solución recibiendo como parámetros de entrada una solución, la matriz de distancias, las ventanas de tiempo, tabla de tiempos entre cliente y una penalización en caso que incumpla con el límite superior de la ventana horaria de algún cliente.

costo[solactual, distancias, ventanas, penalización, tiempos]

El costo de la solución inicial de OP1 es de: \$ 113.15

El costo de la solución inicial de OP2 es de: \$100.6144

3.5.3 Función Intercambio

Esta función nos permite explorar la vecindad cambiando dos clientes entre rutas factibles es decir cumpliendo ventanas de tiempos y capacidad del camión. Es necesario mencionar que este intercambio entre rutas puede mejorar o empeorar el costo de la solución.

En este caso existe un cambio factible de cliente entre la ruta 4 y la ruta 5, se puede observar en el siguiente caso.

$\{\{1,7,5\}, \{1,3,4,11\}, \{1,9\}, \{1,6\}, \{1,10,12\}, \{1,8,2\}\}$

$\{\{1,7,5\}, \{1,3,4,11\}, \{1,9\}, \{1, 10\}, \{1, 6, 12\}, \{1,8,2\}\}$

3.5.4 Lista de candidatos

Dado un número de tamaño, esta lista almacena en sus dos primeras columnas los cambios de clientes entre rutas y en la última columna almacena la diferencia de los costos de estos cambios respectivamente, con el objetivo de identificar si este cambio mejoro o empeoro, esto quiere decir que de toda la lista la fila que tenga en su tercera columna el numero más negativo será el que haya mejorado con más eficiencia la solución.

Lista de candidatos de las dos operaciones respectivamente.

10	9	$5.684341886080801 \times 10^{-14}$
10	8	-10.699999999999989
9	6	7.699999999999989
7	10	-15.599999999999966
7	12	17.699999999999999
3	7	6.
10	7	-15.599999999999966
10	4	22.200000000000045
6	2	9.
10	7	-15.599999999999966
9	4	24.5
7	4	22.399999999999977
10	7	-15.599999999999966
5	12	-3.7999999999999545
12	5	-3.7999999999999545
9	10	$5.684341886080801 \times 10^{-14}$
4	12	0.
9	3	-7.2999999999999545
10	12	5.
4	7	22.399999999999977

12	14	0.
7	12	25.000000000000003
15	14	-0.09999999999999432
11	2	-23.299999999999983
15	9	2.9000000000000057
8	13	-1.4999999999999716
6	7	15.599999999999966
12	11	-0.09999999999999432
9	14	22.900000000000006
8	12	-3.
8	10	-26.200000000000017
9	10	1.
7	13	23.299999999999983
15	2	-25.200000000000017
13	12	0.
4	14	12.099999999999994
12	7	25.000000000000003
15	13	0.30000000000001137
9	14	22.900000000000006
14	15	-0.09999999999999432

3.5.5 Función llamada “memoriapos”

Esta función elige el cambio que genera menor costo en la función en este caso la coordenada elegida es {10,7} para OP1, esta función recibe como parámetros la lista de candidatos y otra función llamada matrixmen que obliga a no seleccionarla en un número determinado de iteraciones.

3.5.6 Función “Actualiza”

La función actualiza trabaja con los resultados de la función memoriapos, es decir las coordenadas que te dan como resultado, actualizando el vector solución con su respectivo cambio.

3.5.7 Función Tabu Search

Basándose en un algoritmo de búsqueda tanto de vecindad local (intensificación) como cambio de vecindad (diversificación) para cada proceso, se realiza una lista de mejores resultados presentados por cada iteración de los procesos ya mencionados del cual al final se obtendrá el mejor es decir el de menor costo de las listas memorias.

A continuación los resultados de esta función, representando la tabla 3-XIV que la ruta 1 visita el cliente 1, 7 y 5.

El resultado del CVRPTW de OP1 es:

r1	1	7	5		
r2	1	3	4	11	
r3	1	9			
r4	1	10			
r5	1	6	12		
r6	1	8	2		

Tabla 3-XIV Solución inicial OP1

Obteniendo una distancia de 288.2 km

Como manera de ilustración se presenta a continuación la grafica de la solución inicial.

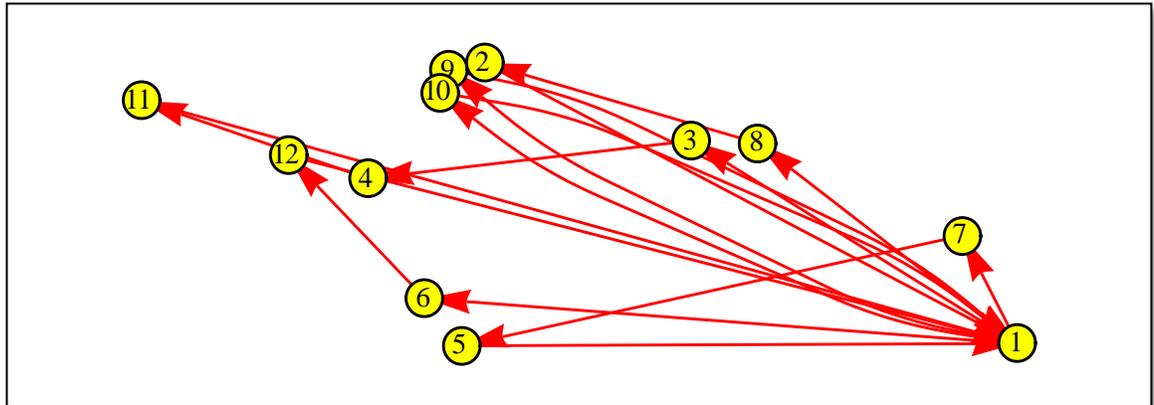


Ilustración 3-2 Solución inicial de OP1

El resultado del CVRPTW de OP2 es:

r1	1	15	8	
r2	1	10	2	
r3	1	12		
r4	1	14		
r5	1	11	3	
r6	1	13		
r7	1	9	7	
r8	1	4	5	6

Tabla 3-XV Solución inicial de OP2

Obteniendo una distancia de 182.4 km

Resultado de la búsqueda utilizando el criterio de intensificación.

El resultado de OP1 es:

r1	1	9	2		
r2	1	6	4	10	
r3	1	7			
r4	1	5			
r5	1	8	3		
r6	1	12	11		

Tabla 3-XVI Solución con intensificación de OP1

Con una distancia total recorrida de: 244.3 km

El resultado de OP2 es:

r1	1	8	7		
r2	1	9	4		
r3	1	14			
r4	1	12			
r5	1	11	10		
r6	1	13			
r7	1	2	3		
r8	1	15	5	6	

Tabla 3-XVII Solución con intensificación de OP2

Con una distancia total recorrida de: 143.55 km

3.5.8 Solución del Tabu Search con Intensificación + Diversificación.

Aplicando el criterio de diversificación las rutas finales para OP1 son:

r1	1	10	4	6	5
r2	1	7	8	3	
r3	1	9	2	12	11

Tabla 3-XVIII Solución con Intensificación y diversificación de OP1

Con una distancia recorrida de: 139.8 km

Aplicando el criterio de diversificación las rutas finales para OP2 son:

r1	1	14	15	13	
r2	1	11	10	12	
r3	1	4	2	5	6
r4	1	9	7	8	3

Tabla 3-XIX Solución con Intensificación y Diversificación de OP2

Con una distancia recorrida de: 93.65 km

Se obtuvo una notable diferencia en las dos operaciones utilizando además del concepto intensificación, el de diversificación logrando una diferencia en distancias recorridas de 104.5 km y 49.9 km respectivamente.

Como manera de ilustración se presenta a continuación la siguiente grafica de OP1

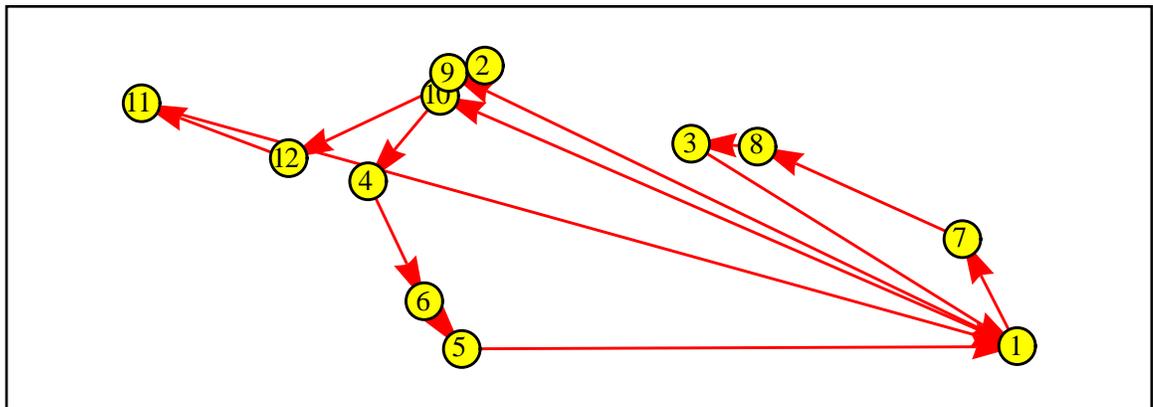


Ilustración 3-3 Solución final de OP1

3.6 Resultados computacionales

La tabla presenta resultados para 4 instancias probadas con la metaheurística para el problema del VRPTW, los cuales fueron resueltos en una laptop TOSHIBA modelo Satélite c645 con un procesador Intel ® Core™ i3 2.40GHz y una memoria RAM de 3.00 GB.

Número de rutas	Rutas	Tiempo [seg.]	Distancia recorrida (km)
5	1,6,5,1 1,3,4,10,1 1,8,1 1,7,1 1,9,2,12,11,1	2.4	203.2
4	1,10,4,6,5,1 1,9,2,12,11,1 1,7,1 1,8,3,1	4.3	160.7
3	1,9,2,12,11,1 1,10,4,6,5,1 1,7,8,3,1	6.6	139.8

Tabla 3-XX Tiempo de ejecución de la función Tabu Search de OP1

Número de rutas	Rutas	Tiempo[seg]	Distancia recorrida (km)
7	1,8,7,3,1 1,11,10,1 1,14,1 1,15,12,1 1,13,1 1,9,4,1 1,2,5,6,1	3	122.75
6	1,3,4,8,7,1 1,15,12,1 1,14,1 1,9,2,5,6,1 1,11,10,1 1,13,1	5	105.15
5	1,3,4,1 1,9,2,8,7,1 1,13,1 1,11,10,12,1 1,9,7,2,8,1	7.8	99.8
4	1,14,15,13,1 1,11,10,12,1 1,4,2,5,6,1 1,9,7,8,3,1	10.65	93.65

Tabla 3-XXI Tiempo de ejecución de la función Tabu Search de OP2

CAPÍTULO 4

4 Análisis de resultados basado en el caso de aplicación.

La metodología que utiliza el OPL para desarrollar este tipo de ruteo se basa en la experiencia que ha desarrollado a través del tiempo que ha permanecido ofreciendo este servicio. La siguiente tabla muestra la comparación entre la situación actual y la solución propuesta por el algoritmo de búsqueda Tabú.

	Actual	Propuesta	Contraste	Contraste (%)
Distancia(Km)	177.5	139.80	37.7	21.23943
Tiempo de viaje (min)	693	685	8	1.15
Costo total (\$)	100.03375	95.5663	4.46745	4.4659
Orden de visita de Los clientes	1,3,8,7,1 1,11,12,4,6,5,1 1,2,9,10,1	1,10,4,6,5,1 1,9,2,12,11,1 1,7,8,3,1		

Tabla 4-I Análisis de resultados de OP1

	Actual	Propuesta	Contraste	Contraste (%)
Distancia(Km)	102.2	93.65	8.55	8.365
Tiempo de viaje (min)	811	766	45	5.54
Costo total (\$)	91.1107	90	1.1107	1.2190
Orden de visita de Los clientes	1,9,7,2,8,1 1,11,10,12,1 1,13,14,15,1 1,4,3,5,6,1	1,14,15,13,1 1,11,10,12,1 1,4,2,5,6,1 1,9,7,8,3,1		

Tabla 4-II Análisis de resultados de OP2

Basándonos en la tabla 4.I y 4.II se puede analizar que el algoritmo propuesto es capaz de lograr buenas soluciones para el enrutamiento de la flota, para el caso se puede observar que el ahorro en distancias es de 37.7 km y 8.55 km diarios lo que representaría una buena cantidad anualmente.

CAPÍTULO 5

5 Conclusiones y Recomendaciones.

5.1 Conclusiones

Para este trabajo se ha diseñado y analizado los parámetros entre OPL-cliente y posteriormente se ha modelado el problema del CVRPTW mediante una heurística de tipo Tabú, lo cual el objetivo primordial era la disminución en distancias recorridas totales generando un beneficio económico para la empresa, abarcando desde la causa raíz del problema que se encontraba la empresa hasta la planificación de nuevas rutas.

A lo largo de la investigación realizada sobre el análisis y diseño de mejoras en el proceso de planificación y distribución, se puede distinguir entre una empresa ordenada con una que no lo es, ya que al momento de realizar una negociación para brindar un buen servicio se debe de plantear parámetros para dar un mejor rumbo al acuerdo entre ambas partes, por lo que se puede concluir que con estos parámetros se logre los siguientes puntos:

- Compartir responsabilidades, fracasos y éxitos.
- Realizar un trabajo más ordenado.
- Brindar un nivel de servicio mejor.

- Ambas partes deberán colaborar en la realización de los principios o parámetros a seguir para que haya equidad entre las dos partes.

Con respecto a la planificación de rutas se puede concluir que:

- El modelo de programación lineal entero mixto formulado en la sección 2.4 y resuelto por una metaheurística implantada en la sección 2.6.3, permitió generar buenos resultados, con respecto a la solución actual de la empresa, cumpliendo así lo objetivos propuestos.
- Se obtuvo un ahorro en combustible de \$2.20 diarios de la flota, que involucra también un beneficio medioambiental.
- También se logró disminuir los tiempos de viajes al visitar todos los clientes por día, generando así más tiempo de descanso para los choferes por día.
- En distancias totales recorridas se obtuvo una diferencia de 26.6 km con respecto a la situación actual lo que generó un ahorro del 14.98% diarios.
- Se logró cumplir de manera satisfactoriamente con las ventanas horarias de los clientes.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda implementar los parámetros propuestos en el presente trabajo por el intercambio de información entre los Operadores Logísticos y sus clientes, con el fin de acortar ciclos de entrega, optimizar los movimientos logísticos, mejorar el nivel de notificación sobre stocks y el servicio al cliente.

También se recomienda por los resultados obtenidos, el uso de este algoritmo para el enrutamiento vehicular, ya que amplía el espacio de búsqueda de soluciones factibles, por lo que manualmente con un número mayor de clientes sería difícil explorar esta búsqueda.

Se recomienda utilizar este método añadiéndole una función de distribución de probabilidades para el tiempo de atención en los clientes, esto supondría la obtención de datos aún más realistas.

Se sugiere comparar los resultados de la metaheurística Tabu Search con otro tipo de metaheurísticas como por ejemplo con la de Recocido Simulado mencionada antes en el capítulo 2, con el fin de diferenciar la eficiencia de las mismas.

Además se sugiere modificar el algoritmo en los módulos de solución inicial y exploración de vecindario, agregando otro tipo de metodologías que mejoren el

desempeño de la metaheurística tanto en tiempo computacional como los resultados.

Bibliografía

- [1] A., T. H. (2004). *Investigación de Operaciones*. Mexico: Pearson.
- [2] Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *EIA, ISSN, 23-38*.
- [3] Delgado, E. (2010). *Problema del ruteo vehicular*. Guayaquil.
- [4] J., F. H. (2007). *Introducción a la investigación de operaciones*. Mexico: Pearson.
- [5] María González PRODUCCIÓN, P. Y. (2 de 2002). *GESTIOPOLIS*. Obtenido de <http://www.gestiopolis.com/canales/economia/articulos/42/modeloasigna.htm>
- [6] Pirabán, A. J. (2008). *Problema de enrutamiento de vehículos*. Obtenido de <http://andresjaquep.files.wordpress.com/2008/12/estado-del-arte-vrp-primer-entrega.pdf>
- [7] Salvador, B. R., Gutiérrez Andrade, M. A., & De los Cobos Silva, S. G. (s.f.). *BUSQUEDA TABU: Un Procedimiento Heurístico para Solucionar Problemas de Optimización Combinatoria*. Obtenido de <http://www.azc.uam.mx/publicaciones/enlinea2/1-3.htm>
- [8] UDT-IA *Unidad de desarrollo Tecnológico en Inteligencia artificial*. (9 de 2002). Obtenido de <http://www.iiia.csic.es/udt/es/blog/jrodriguez/2009/vehicle-routing-problem-vrp-problema-del-enrutamiento-vehiculos>