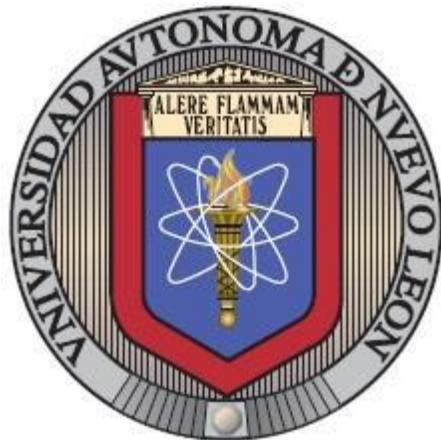


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PARA  
DETERMINAR LA RUTA DE DISTRIBUCIÓN Y  
SUMINISTRO EN UNA EMPRESA DE MANUFACTURA**

**POR**

**ING. JESSICA LIZETH SALAZAR NORATO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

**AGOSTO, 2019**

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



**DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PARA  
DETERMINAR LA RUTA DE DISTRIBUCIÓN Y  
SUMINISTRO EN UNA EMPRESA DE MANUFACTURA**

**POR**

**ING. JESSICA LIZETH SALAZAR NORATO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

**AGOSTO, 2019**

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Subdirector de Estudios de Posgrado

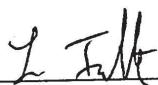
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Desarrollo de procedimientos para determinar la ruta de distribución y suministro en una empresa de manufactura», realizada por el alumno Ing. Jessica Lizeth Salazar Norato, con número de matrícula 1887477, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis



Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

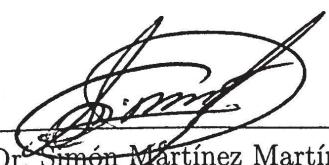
Asesor



Dr. Luis Alfonso Infante Rivera

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado



Jania Astrid Saucedo

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Revisor

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 19 de agosto del 2019

*A mis padres:*

*José Luis Salazar García y Ma. del Carmen Norato Aradillas por su apoyo incondicional, comprensión y amor que me han brindado en cada etapa de mi vida.*

*A mi hermano:*

*José Luis Salazar Norato, por siempre confiar en mí.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Generalidades . . . . .	1
1.2. Descripción del problema . . . . .	3
1.3. Objetivo . . . . .	4
1.4. Hipótesis . . . . .	4
1.5. Justificación . . . . .	5
1.6. Metodología . . . . .	5
1.7. Estructura de tesis . . . . .	6
<b>2. Antecedentes</b>	<b>7</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>18</b>
3.1. Descripción del problema . . . . .	19
3.2. Características del problema . . . . .	20
3.3. Problema de Ruteo de Inventarios IRP . . . . .	21

3.3.1. Primera fase . . . . .	22
3.3.2. Segunda fase . . . . .	25
<b>4. Resultados y análisis</b>	<b>31</b>
4.1. Instancias generadas . . . . .	31
4.1.1. Validación de la primera fase . . . . .	32
4.1.2. Validación de la segunda fase . . . . .	35
4.2. Caso de estudio . . . . .	39
<b>5. Conclusiones</b>	<b>42</b>
5.1. Recomendaciones . . . . .	43

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Descripción del problema. . . . .	4
3.1. Desarrollo de la red de distribución. . . . .	29

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Revisión de la literatura con características similares. . . . .	17
4.1. Oferta semanal de proveedores . . . . .	33
4.2. Envío de producto del proveedor 1 a la planta. . . . .	33
4.3. Envío de producto del proveedor 2 a la planta. . . . .	34
4.4. Envío de producto del proveedor 3 a la planta. . . . .	34
4.5. Envío de producto del proveedor 4 a la planta. . . . .	35
4.6. Instancia pequeña. . . . .	36
4.7. Instancia mediana. . . . .	37
4.8. Instancia grande. . . . .	38
4.9. Matriz de tiempos entre proveedores y depósito. . . . .	39
4.10. Oferta de proveedores. . . . .	39
4.11. Matriz de tiempos entre clientes y depósito. . . . .	40
4.12. Demanda de clientes. . . . .	40
4.13. Instancia del caso de estudio. . . . .	41

# RESUMEN

---

Ing. Jessica Lizeth Salazar Norato.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR LA RUTA DE DISTRIBUCIÓN Y SUMINISTRO EN UNA EMPRESA DE MANUFACTURA.

Número de páginas: 48.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** El objetivo de este trabajo de tesis es estudiar el problema de ruteo de inventarios, o IRP por sus siglas en inglés, el cual incorpora de manera conjunta la administración de inventarios y la distribución, esto con el fin de resolver el caso de estudio que se presenta en el presente trabajo, de determinar la ruta de distribución y suministro en una empresa de manufactura, mediante técnicas de investigación de operaciones.

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** Al aplicar la metodología propuesta, se logra el objetivo de determinar la ruta que debe seguir la unidad para la distribución de la mercancía, así como no desabastecer la planta de materia prima y entregar el producto terminado a cliente a tiempo. La contribución principal fue la planeación diaria de las rutas que debe seguir la unidad, así como minimizar el tiempo total de

la ruta, logrando aumentar la productividad de la unidad, aumentar el métrico de entregas a tiempo y evitar paros de línea en planta.

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

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 GENERALIDADES

La distribución de materiales entre diferentes puntos juega un papel central en la gestión de los sistemas logísticos, por lo cual, su adecuada planeación puede significar considerables ahorros, los cuales justifican en gran medida la utilización de técnicas de Investigación de Operaciones como facilitadores para su planeación, ya que se estima que los costos de transportación representan del 10 % al 20 % del costo total de un bien (Toth y Vigo, 2002).

Debido al alto interés científico y organizacional en los problemas de distribución, estos problemas han sido objeto de investigación durante las últimas cuatro décadas por sus aplicaciones en áreas como transporte, logística, comunicaciones, manufactura, militar, entre otros.

Estos problemas se abordan dentro de la logística y cadena de suministro de una empresa de la región, para comprender los conceptos básicos, se define la cadena de suministro como la administración y planeación de las actividades que incluyen el abastecimiento, el procuramiento, la transformación de los productos y actividades logísticas. También incluye la coordinación y colaboración con otros participantes en el canal, como proveedores, intermediarios, proveedores 3PL y clientes. En esencia,

la administración de la cadena de suministro integra el suministro y la demanda dentro de las organizaciones y entre ellas (Professionals, 2018).

La logística se define como la parte de la cadena de suministro que planea, implementa y controla la eficiencia y eficacia del flujo y almacenamiento de mercancías, servicios e información que va desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el fin de cumplir con los requisitos de los clientes (Professionals, 2018).

El transporte es una de las actividades más representativas dentro de la cadena de suministro, ya que en la actualidad, las empresas no logran operar sin la distribución de sus materias primas o su producto terminado. Es por ello, la importancia que las empresas estudien y analicen detalladamente el transporte de sus productos para crear una estrategia de distribución que minimice los costos de transporte y a su vez, disminuya los costos relativos a la cadena de suministro.

La empresa de estudio es una empresa de manufactura, donde se crean edificios inteligentes, soluciones de ahorro de energía, infraestructura integrada, y sistemas de transporte de última generación que funcionan en conjunto y sin problemas para cumplir la promesa de construir ciudades y comunidades inteligentes. En su núcleo, esa promesa tiene que ver con brindar innovación para hacer que las vidas de las personas (y el mundo) sean mejores.

La Organización es líder mundial en tecnología diversificada en varias industrias, y cuenta con una amplia gama de clientes en más de 150 países.

Su compromiso con la sustentabilidad surge en su comienzo en 1883, con la invención del primer termostato ambiental eléctrico patentado por el fundador de la Organización.

La misión de la empresa, específicamente de la planta de estudio, la cual ensambla compresores, es un mundo seguro, cómodo y sustentable. La visión de la misma es ayudar a nuestros clientes a ganar en todo momento y en todo lugar. Y los valores con los que se rige son los siguientes: la integridad es lo primero, impulsados

por los clientes, perseguimos un propósito, enfocados en el futuro, un equipo.

La planta compresores se encuentra en Ciénega de Flores, NL. En ella se ensamblan compresores de tornillo y tiene como clientes otras plantas de la misma empresa en USA y Europa principalmente. Esta planta cuenta con tres naves, donde se ensamblan compresores de tipo tornillo y de tipo centrífugo, además de la fabricación de rotores para los compresores de tipo tornillo.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La planta compresores cuenta con numerosos proveedores nacionales e internacionales, así como un CEDIS en la región. Estos proveedores en su mayoría entregan producto mediante transporte de paquetería como DHL, UPS, FedEx, XPO, entre otros. A diferencia de tres proveedores de la zona conurbada a los que la planta es la encargada de recoger el material.

Para realizar estas recolecciones de materia prima con los proveedores y entregar el material en planta, se tiene en contrato de renta con una línea transportista, un tracto camión, cinco cajas secas de 53 pies y un chofer que está disponible de lunes a viernes en un horario de 8:30 am a 18:30 pm. Este equipo es utilizado también para entregar producto terminado (compresores) en el CEDIS y con un cliente, que también se encuentran en la zona conurbada. De igual manera, en el CEDIS se almacena materia prima y producto terminado el cual se envía a cliente, por lo que para efectos de esta investigación, se tomará al CEDIS como cliente y como proveedor.

Las premisas del problema de estudio son que cada uno de los cuatro proveedores entregan un producto diferente a planta, cada determinado periodo de tiempo. Cabe mencionar que se tiene una demanda conocida para cada uno de los números de parte de estos proveedores y que la planta requiere de un inventario de seguridad para cada producto.

Se considera también que la planta hace envíos de producto terminado a CEDIS y a cliente de tres a cinco veces por semana de acuerdo al plan de producción, y a su vez, del CEDIS se envía producto terminado a cliente de tres a cuatro veces por semana, de igual manera, de acuerdo al plan de producción del cliente.

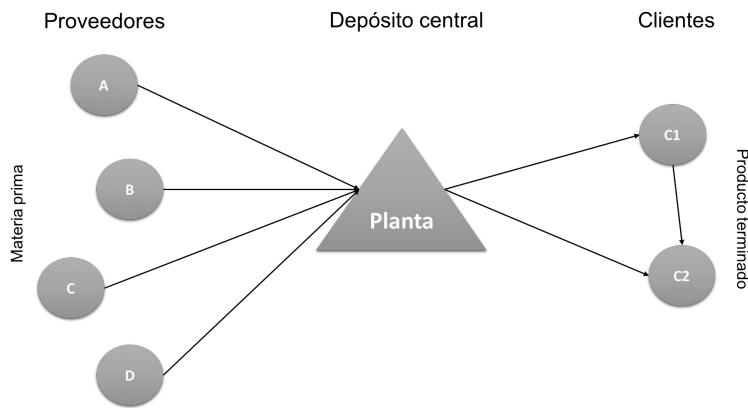


Figura 1.1: Descripción del problema.

### 1.3 OBJETIVO

Determinar la ruta que debe seguir una unidad para no desabastecer la planta de materia prima y entregar el producto terminado al cliente a tiempo mediante la utilización de herramientas de investigación de operaciones.

### 1.4 HIPÓTESIS

La utilización de técnicas de investigación de operaciones para la resolución de problemas de planeación operativa, permite la obtención de soluciones de calidad en un tiempo computacional razonable.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

La diligencia de realizar esta investigación se presenta debido a la falta de tiempo para cumplir con el total de recolecciones programadas en el día a día, ya que al acudir a una ruta aleatoria, el chofer se dirige a donde le llaman y no tiene una programación previa, lo que se tiene como consecuencia dejar recolecciones o entregas para el día siguiente, afectando el métrico de entregas a tiempo a cliente y dejando desabastecida a la planta de algún número de parte de uno de los proveedores.

Es por esto, que se tiene la necesidad de acudir a procedimientos que resuelvan el problema de orden en la ruta a seguir, tomando en cuenta premisas importantes como no detener alguna de las líneas de producción en planta por falta de materia prima o bajar el métrico de entregas a tiempo por no enviar el producto terminado a cliente en la fecha requerida.

## 1.6 METODOLOGÍA

Una de las propuestas de solución revisadas en la literatura, consisten en dividir el problema en dos etapas:

La primera resuelve el problema de tamaño de lote de los pedidos de materia prima que se enviará de cada proveedor hacia la planta mediante el algoritmo de Wagner-Whitin.

La segunda etapa consiste en el ruteo del vehículo a través de los nodos para tener como resultado la ruta a seguir.

La solución que se propone en esta investigación consiste en adaptar las dos fases revisadas en la literatura, integrando las características particulares del problema para llegar a la ruta que debe seguir el chofer en su operación diaria.

## 1.7 ESTRUCTURA DE TESIS

Esta tesis está estructurada en 6 capítulos, en el primero, se aborda el problema de estudio y se especifica el objetivo, así como también se justifica la realización del mismo. En el segundo capítulo, se analiza el estado del arte de los problemas de ruteo de inventarios y los métodos que utilizan diferentes autores para resolverlos.

Una vez analizada la literatura sobre el problema, en el tercer y cuarto capítulo se describe el método a utilizar y los pasos que se utilizaron para llegar a su resolución, así como el análisis del modelo matemático e implementación. En el quinto capítulo, se realiza un análisis de los resultados y su relación con la operación diaria de la empresa. Por último, en el sexto capítulo se especifican las contribuciones de esta investigación, así como el trabajo a futuro.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

El presente capítulo muestra el estado del arte del problema que justifica esta investigación y una breve introducción a conceptos básicos que ayudan al entendimiento del mismo.

Esta revisión de la literatura tiene como propósito aportar un mejor entendimiento de las ventajas de utilizar un problema que combina el ruteo de vehículos con la administración de inventarios y no verlo como dos problemas con soluciones diferentes. El propósito es también conocer los problemas presentados en los últimos años relacionados con el tema y la manera en que los autores han encontrado las mejores aportaciones para la solución de éstos problemas.

Debido a que las redes se vuelven cada vez más complejas y los mercados más competitivos por la globalización, está aumentando la variabilidad de la demanda, por lo que, se está prestando mayor atención a la logística, ya que mantener los niveles de servicio que necesitan los clientes requiere del desarrollo de varias estrategias para mantener bajos costos de transportación e inventarios.

El desempeño de los integrantes de las cadenas de suministro depende en su mutua integración con la cadena completa y en cómo se desarrollan juntos.

En la revisión de la literatura se observa que en los años recientes es cada

vez más común encontrar Problemas de Ruteo de Vehículos, VRP por sus siglas en inglés, el cual es conocido como un problema de diseño de las rutas que debe seguir un vehículo con el fin de entregar o recolectar productos. La importancia del estudio de los problemas de ruteo de vehículos y de todas sus variantes es de gran importancia en la logística, distribución, transporte y administración de la cadena de suministro al representar un porcentaje significativo de los costos logísticos totales en las actividades de distribución de mercancías. Dantzing y Ramser fueron los primeros en abordar este tipo de problemas en el año de 1959 con un problema real de distribución de gasolina en las estaciones de servicio (Baños *et al.*, 2013).

El VRP es un problema de diseño de rutas al mínimo costo posible que tienen su origen y fin en un depósito central, esto para una flota de vehículos de capacidad homogénea o para uno solo, que le brindan servicio a clientes con demanda conocida. Cada cliente es visitado una sola vez y todos los clientes deben de ser asignados a un vehículo, siempre y cuando su demanda no exceda las capacidades del vehículo (Petch y Salhi, 2003).

El problema de ruteo de vehículos se considera de clase **NP-hard**, es decir, que la solución no se puede encontrar en un tiempo polinomial.

El interés en el VRP para la solución de problemas logísticos está dado por su relevancia práctica y su bajo nivel de dificultad. Existen variantes del VRP con el mismo núcleo de problema pero con particularidades que los hacen diferentes entre sí, que han sido estudiados a lo largo de los últimos 40 años. Las variantes más importantes del VRP incluyen el VRP capacitado, con ventanas de tiempo, con redes de retorno, con vehículos de distintas capacidades y el problema de recolección y entrega (Battarra *et al.*, 2009).

El VRP capacitado, CVRP por sus siglas en inglés, determina las rutas de diferentes vehículos con una capacidad limitada, que parten desde un depósito central y que deben de pasar por una serie de clientes o almacenes para recoger o distribuir bienes basados en una demanda y regresar al punto de origen de manera que la

distancia total recorrida por todos los vehículos sea la mínima, tomando en cuenta que el vehículo tenga capacidad para la opción de que los clientes puedan devolver ciertos bienes. Este es una de las variantes del VRP más sencillas ya que no se tiene en cuenta el horario de entrega o recolección en cada punto a visitar.

Otra variante del VRP integra ventanas de tiempo, VRPTW por sus siglas en inglés. En este problema se tiene la restricción de que cada cliente sólo puede recibir la visita del vehículo durante un intervalo de tiempo dado previamente (Restrepo *et al.*, 2008).

En el VRP con redes de retorno, VRPB por sus siglas en inglés, los clientes pueden solicitar regresar mercancía y la premisa principal es que para que se pueda realizar la recolección de material en un punto, es necesario que ese mismo punto tenga una entrega programada para asegurar una ruta al mínimo costo posible, tomando en cuenta que la demanda es conocida. El problema de VRP con retornos es muy similar al VRP con recolecciones y entregas, solo que el VRPB añade la restricción de que todas las entregas de cada ruta deben de ser realizadas antes de realizar recolecciones.

El MFVRP o VRP con vehículos de distintas capacidades, como su nombre lo dice, considera puntualmente la capacidad de cada vehículo en cada una de las rutas que realice a los diferentes clientes o almacenes, ya que un vehículo con una capacidad mayor, podrá cubrir una ruta más amplia y cubrir mayor demanda (Restrepo *et al.*, 2008).

Otra variante importante del VRP es el VRPPD o problema de ruteo de vehículos con recolecciones y entregas, el cual tiene el objetivo de encontrar una serie de rutas para un conjunto de vehículos, los cuales deben de suministrar la demanda de los clientes al menor costo posible, añadiendo la restricción de que los vehículos tengan la suficiente capacidad para recoger y/o entregar bienes en cada uno de los nodos, iniciando y terminando en el mismo punto central (Ballesteros Silva y Escobar Zuluaga, 2016).

Uno de los casos más estudiados es el Problema de Ruteo de Inventarios, o IRP por sus siglas en inglés, el cual combina el clásico problema de ruteo con las variantes revisadas previamente, con la administración de los inventarios.

Esta tesis presenta una metodología de solución para el problema de ruteo de inventarios con la motivación de que el IRP permite el estudio de dos problemas que son de interés en las empresas, que es la administración del inventario y la distribución, con los cuales esperan aumentar su productividad y reducir costos para mantener una ventaja competitiva. Este problema se ha estudiado en las industrias de supermercados, cadenas de tiendas, cadenas de ropa, industria automotriz, industria de bebidas, industria petroquímica, entre otras (Dabiri *et al.*, 2017).

El IRP es utilizado para problemas de inventarios y transporte y supone ahorros hasta del 7.3% al lograr que el proveedor controle el abastecimiento de los clientes tomando decisiones de reposición con base en políticas de inventarios. Se utiliza también en la distribución de material a través de rutas hacia los clientes con demanda variable y la premisa de que ningún cliente se quede sin inventario.

Por ejemplo, en la industria de los supermercados un individuo central es el que toma las decisiones de inventario de manera planificada para toda su red de minoristas, con vehículos de capacidad limitada comparado con la demanda del volumen total requerido; aquí el IRP modela el reabastecimiento de todo el conjunto de minoristas en un corto o mediano plazo desde el punto central consolidando todos los envíos.

Dentro del IRP es común que se maneje también un modelo de Inventario Manejado por el Proveedor, VMI por sus siglas en inglés, que integrada a la cadena de suministro, supone ahorros de transporte a corto y largo plazo. Las características del VMI son la coordinación entre el proveedor y el cliente, buscando una situación de ganar - ganar al minimizar costos, dándole la opción al proveedor de consolidar embarques con la responsabilidad de manejar el inventario del cliente, por lo que, integra el inventario y el transporte.

En el modelo VMI se deben de mantener los niveles del inventario de seguridad en el punto central para manejar de manera satisfactoria las variaciones de la demanda.

En la revisión de la literatura se encontraron problemas de ruteo de inventarios con diferentes características particulares en casos reales, los cuales se mencionan a continuación.

Li *et al.* (2014) estudian el problema de IRP considerando las horas de servicio del cliente y del proveedor en la industria de la distribución de gasolina y aceites, así como también se tiene preferencia en evadir los desabastos de material, sobre los costos de transportación. El objetivo es minimizar el tiempo total de ruta, el cual mencionan que no se ha analizado en la literatura.

El método de solución es un algoritmo de búsqueda Tabú, el cual desarrolla un procedimiento eficiente y efectivo para mejorar la calidad de la búsqueda en cada iteración. Para validar los resultados obtenidos por el algoritmo, algunos límites inferiores son desarrollados por una técnica de relajación Lagrangiana. Los resultados obtenidos muestran que la herramienta es capaz de proporcionar una solución cercana al óptimo en tiempo computacionalmente razonable.

El IRP se ha estudiado también en problemas del transporte marítimo, cuyos métodos de solución se mencionan a continuación al no tener diferencias significativas contra los problemas de transporte terrestre.

En Archetti *et al.* (2018) presentan un caso de estudio marítimo donde se aplica el IRP, al tener una flota de barcos que envían múltiples productos a diferentes lugares. Se propone como método de solución una metaheurística híbrida de dos fases llamada Generación y Enrutamiento Híbrido de Carga (HCGR). En la primera etapa, el IRP es convertido en un problema de enrutamiento y programación de barcos, generando cargas sujetas a restricciones de inventario mediante el uso de programación matemática. En la segunda etapa se utiliza una búsqueda del vecino más cercano para resolver el problema del enrutamiento y programación del barco.

La heurística HCGR modifica la carga generada basado en la información que se obtuvo durante el proceso; esta heurística es comparada con un algoritmo exacto en una instancia de tamaño pequeño.

Se presentan a continuación otras características del problema de ruteo de inventarios que se han estudiado en los últimos años con problemas que involucran productos de manejo especial como los perecederos y productos de carga general con variables del IRP con capacidad limitada, inventarios cíclicos y otro problema de multi-producto, multi-periodo y multi-vehículo. Se integran al estudio del estado del arte de este problema, al tratarse de productos que necesitan ser entregados lo más pronto posible por su fecha de caducidad, premura de entrega que se tiene con este problema de estudio al tener en común el objetivo de minimizar tiempos de recorrido y envío del lote óptimo de producto.

Los autores Azadeh *et al.* (2017) presentan un modelo de IRP con transbordo en una cadena de suministro de producto perecedero, en este problema se integran decisiones de enrutamiento e inventarios para cumplir con la demanda del cliente. Los autores utilizan un algoritmo genético para resolver este problema; los parámetros del algoritmo son determinados con un diseño de Taguchi para lograr la mejor solución.

Hiassat *et al.* (2017) hablan de un modelo de localización combinado con ruteo de inventarios en una cadena de suministro de productos perecederos el cual determina el número y localización de almacenes, el nivel de inventario de cada uno y las rutas que debe recorrer cada vehículo. En otras palabras, el modelo propone añadir decisiones de localización al problema de ruteo de inventarios. El problema es resuelto con un algoritmo genético para obtener resultados en un tiempo razonable, y es estructurado mediante una representación de cromosoma y una heurística de búsqueda local.

Qiu *et al.* (2018) trabajan también sobre una cadena de suministro de productos perecederos y presentan un modelo de IRP, pero a diferencia del anterior donde su objeto de estudio es la localización, los autores se enfocan en la cantidad a producir,

es decir, analizan la cantidad de producto a entregar y vender con periodos de manufactura variados. Presentan de la mano del IRP, al PRP o Problemas de Ruteo en la Producción con un inventario de producto perecedero. Resuelven el problema mediante un algoritmo de ramificación y corte, introduciendo nuevas familias de tamaño de lote y eliminación de restricciones por medio del subtour Miller-Tucker-Zemlin.

Existen otras variantes del IRP con características similares al problema de estudio y con un objetivo en común: minimizar costos, que traducido a nuestro problema se toma como la reducción de tiempo de ciclo y aumentar la efectividad del equipo que se tiene disponible.

Según Bertazzi *et al.* (2015) estudian una parte del problema de ruteo de inventarios donde el proveedor tiene una capacidad limitada de producción y la demanda de sus clientes es suministrada por viajes que se realizan con servicio de transporte. El objetivo que presentan es minimizar los costos totales que engloban los costos de inventarios en el proveedor y en los clientes, los costos de penalidad por falta de producto que manejan los clientes y los costos de transporte. El método de solución utilizado es una formulación de programación dinámica estocástica que permite encontrar la solución óptima en instancias pequeñas; esto seguido por una metaheurística, integrando un algoritmo de despliegue y la solución óptima del modelo de programación lineal, teniendo como resultado, el poder resolver instancias más grandes de problemas reales.

Rayat *et al.* (2017) presentan un problema de IRP de multi-producto y multi-periodo, considerando riesgos de disruptión en centros de distribución. Este problema lo abordan con un modelo de programación bi-objetivo no lineal mixto, donde el primer objetivo minimiza los costos de localización, de ruteo, de transporte y por ordenar, mientras que el segundo objetivo minimiza los costos relacionados los riesgos de disruptión en centros de distribución.

Vansteenwegen y Mateo (2014) estudian un anexo del IRP, que es el Problema

de Ruteo de Inventarios Cílicos con un solo Vehículo, SV-CIRP por sus siglas en inglés, en donde el proveedor optimiza y combina los costos de distribución e inventarios de los clientes; el objetivo es minimizar estos dos costos y maximizar el material recolectado, esto seleccionando un conjunto de clientes y determinando la cantidad que se le entregará a cada cliente y las rutas de los vehículos, considerando no dejar sin material a los clientes. El método de solución de este problema es una metaheurística de búsqueda local iterada y el objetivo es minimizar el costo total determinando la cantidad de material que se le entregará a los clientes y la ruta del vehículo, evitando dejar sin material al cliente.

Peres *et al.* (2017) en su investigación mencionan un modelo IRP de multi producto, multi-periodo y multi-vehículo donde se considera el transbordo entre centros de distribución en donde el transbordo se realiza con los mismos vehículos utilizados para el movimiento de material de la planta a los centros de distribución en lugar de que el transporte sea subcontratado. Consideran también una restricción de tiempo, la cual asegura que cada vehículo debe regresar a la planta después de cada ruta para que pueda estar disponible para la siguiente ruta; esta restricción permite que la flota de vehículos sea más flexible, por lo que, es muy importante para las Compañías que tienen su propio transporte.

Para resolver este IRP, proponen una metaheurística. La distribución de las unidades y la cantidad de material a entregar se realiza mediante la experiencia empírica utilizando principalmente hojas de cálculo. La contribución de la investigación es un modelo que incorpora el transbordo por los mismos vehículos que se utilizan en la distribución diaria, una nueva variante de metaheurística basada en IRP y la aplicación de ambos en un caso de estudio real.

Los métodos de solución que se han revisado en la literatura varían dependiendo de las características específicas del problema pero se ha encontrado como factor común, la utilización de algoritmos aproximados que no garantizan encontrar una solución óptima, pero que pretenden encontrar soluciones aproximadas en tiem-

pos computacionales prácticos para la toma de decisiones en problemas reales de la industria. A continuación se detallan casos de estudio con soluciones factibles al problema que se presenta actualmente en la empresa, el estudio de estas investigaciones es fundamental para la etapa de metodología.

Según Cordeau *et al.* (2015) en su caso de estudio, tienen una flota de vehículos entregando diferentes productos en un horizonte de tiempo. Presentan una heurística desarrollada en tres fases, en la primera se determina el plan de suministro usando un método Lagrangiano, en la segunda fase se planea la secuencia de entregas con un procedimiento para construir las rutas de los vehículos, y en la tercera fase se incorporan las decisiones de planeación y ruteo con un modelo de programación lineal de enteros mixtos. Los resultados muestran que la heurística que desarrollaron es computacionalmente efectiva en instancias de 50 clientes y 5 tipos de producto.

Park *et al.* (2016) proponen un algoritmo genético para el IRP con una estrategia de inventario manejado por el proveedor, donde se considera un proveedor y múltiples minoristas. El algoritmo genético esta inspirado en la optimización en CPLEX, el cual es su punto de comparación y determina el momento de abastecimiento, cantidad y las rutas del vehículo maximizando las ganancias en la cadena de suministro.

Hemmati *et al.* (2015) proponen una heurística de dos etapas que determina las rutas e itinerario de los vehículos de la compañía transportista, la cual trabaja en un modelo de VMI, siendo la compañía transportista el proveedor encargado de monitorear los inventarios. La primera etapa de la heurística es convertir los inventarios en carga para convertir el problema en uno clásico de ruteo y programación; en la segunda etapa se utiliza una búsqueda adaptativa del vecino más cercano para resolver el problema de enrutamiento y programación de la carga. Los resultados de la heurística son comparados con soluciones exactas de instancias grandes, los cuales muestran ahorros potenciales de convertir los contratos tradicionales de arrendamiento a un servicio integrado de VMI.

Dong *et al.* (2017) proponen un algoritmo para el IRP que reduce el tamaño del problema eliminando a los clientes y nodos que son irrelevantes; esto mediante un método de descomposición que divide al problema en dos etapas, la primera etapa es un VRP para reducir el costo de distribución al satisfacer la mínima demanda; en la segunda etapa utilizan un modelo MILP para determinar el itinerario de los choferes, adoptando las rutas obtenidas de la primera etapa.

Finalmente, Nambirajan *et al.* (2016) proponen para un sistema VMI dentro del IRP, separar el problema en dos fases, en la primera utilizan el algoritmo Wagner-Whitin para determinar el tamaño del lote y en la segunda fase se realiza el ruteo del vehículo a través de los nodos mediante un modelo de programación entera lineal y una heurística llamada CARE (agrupación en cluster, asignación, enrutamiento extendido) en la cual se utiliza un modelo de programación dinámica.

A continuación se muestra una tabla comparativa de los diferentes métodos de solución empleados por distintos autores relacionados al ruteo de vehículos.

Características de los problemas de ruteo:

- Multi-Objetivo (MO)
- Ventanas de tiempo (VT)
- Multi-fase (MF)
- Viajes múltiples (VM)
- Múltiples periodos (MT)
- Múltiples productos (MP)
- Flota con misma capacidad (FC)
- Múltiples depósitos (MD)

Referencia	MO	VT	MF	VM	MT	MP	FC	MD	Método de solución
Baños <i>et al.</i> (2013)	✓	✓	-	-	-	-	-	-	Metaheurística híbrida
Petch y Salhi (2003)	-	-	✓	✓	-	-	-	-	Heurística constructiva
Li <i>et al.</i> (2014)	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	Algoritmo de búsqueda tabú
Archetti <i>et al.</i> (2018)	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	Metaheurística híbrida
Azadeh <i>et al.</i> (2017)	-	-	-	-	-	✓	✓	-	Algoritmo genético
Qiu <i>et al.</i> (2018)	-	-	-	✓	✓	✓	-	✓	Algoritmo de ramificación y corte
Bertazzi <i>et al.</i> (2015)	-	-	-	✓	✓	-	✓	-	Programación dinámica estocástica y metaheurística
Vansteenwegen y Mateo (2014)	-	-	-	✓	-	-	✓	✓	Metaheurística de búsqueda local
Peres <i>et al.</i> (2017)	✓	-	-	✓	✓	-	-	✓	Metaheurística basada en IRP

Tabla 2.1: Revisión de la literatura con características similares.

En la literatura, autores utilizan heurísticas como método de solución a los problemas de ruteo. Una heurística facilita la búsqueda de soluciones a problemas a un costo computacional razonable, aunque no garantice su optimalidad (Suarez, 2013).

A partir del estudio de los métodos de solución revisados previamente, se concluye que la mejor solución que mejor se adapta al problema actual es dividir el problema en dos fases, en la primera que es la determinación del tamaño del lote mediante el algoritmo de Wagner-Within y la segunda fase la cual realiza el ruteo del vehículo entre la planta, los proveedores y los clientes, el cual se revisa detalladamente en el siguiente capítulo de metodología para proponer una solución factible.

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

La metodología propuesta en este capítulo propone una solución al problema de ruteo de inventarios que sirva como herramienta para el cumplimiento del objetivo de determinar la ruta que debe seguir la unidad para no desabastecer la planta de materia prima y entregar el producto terminado al cliente a tiempo.

Se tienen considerados cuatro proveedores, dos clientes y un depósito central que es la planta. Para el desarrollo de esta metodología, se divide el problema en dos fases: la primera resuelve la incertidumbre de saber cuánto material enviar de cada proveedor a la planta y cada cuánto tiempo, así como los lotes de producto terminado que se tienen que distribuir a los clientes y la segunda fase, que es el ruteo del vehículo entre cada uno de los nodos.

El Problema de Ruteo de Inventarios, IRP, afecta directamente la cadena de suministro, ya que de forma conceptual, la administración de la misma, integra el suministro y la demanda dentro de las organizaciones y entre ellas; específicamente afecta a la logística que se define como la parte de la cadena de suministro que planea, implementa y controla la eficiencia y eficacia del flujo y almacenamiento de mercancías, servicios e información que va desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el fin de cumplir con los requisitos de los clientes (Professionals, 2018).

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema de estudio se aborda dentro de la logística y cadena de suministro de una empresa de la región; una organización de nivel mundial donde se crean edificios inteligentes, soluciones de ahorro de energía, infraestructura integrada y sistemas de transporte de última generación que funcionan en conjunto y sin problemas para cumplir la promesa de construir ciudades y comunidades inteligentes. En su núcleo, esa promesa tiene que ver con brindar innovación para hacer que las vidas de las personas y el mundo sean mejores.

El estudio se realiza específicamente en la planta Compresores, la cual se encuentra en Ciénega de Flores, NL. En ella se ensamblan compresores de tornillo y tiene como clientes otras plantas de la misma organización en USA y Europa principalmente. Esta planta cuenta con tres naves, donde se ensamblan compresores de tipo tornillo y de tipo centrífugo, además de la fabricación de rotores para los compresores de tipo tornillo.

La planta cuenta con numerosos proveedores nacionales e internacionales, así como un CEDIS en la región. Estos proveedores en su mayoría entregan producto mediante transporte de paquetería como DHL, UPS, FedEx, XPO, entre otros. A diferencia de cuatro proveedores de la zona conurbada a los que la planta es la encargada de recoger el material.

Para realizar estas recolecciones de materia prima con los proveedores y entregar el material en planta, se tiene un contrato de renta con una línea transportista, un tractocamión, cinco cajas secas de 53 pies y un chofer que está disponible de Lunes a Viernes en un horario de 8:30 am a 18:30 pm. Este equipo es utilizado también para entregar producto terminado (compresores) en el CEDIS y con un cliente, que también se encuentran en la zona conurbada. De igual manera, en el CEDIS se almacena materia prima y producto terminado el cual se envía a cliente y para efectos de esta investigación, se tomará al CEDIS como cliente y como proveedor.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA

Las ventajas de adaptar el problema de ruteo de inventarios, es que existen variantes que hacen cada problema particular y dependiendo de las mismas, es el método de solución que se va a elegir.

Las características del problema de estudio son las siguientes:

- Cada uno de los cuatro proveedores entrega un producto diferente a planta, cada determinado periodo de tiempo.
- Se tiene una demanda conocida para cada uno de los números de parte suministrados por los proveedores.
- La planta requiere de un inventario de seguridad para cada producto.
- Se considera una capacidad homogénea para las cajas y cada vez que una caja llega a su máxima capacidad, debe ser enviada a la planta para su descarga.
- Se manejan ventanas de tiempo.

Actualmente, la planta hace envíos de producto terminado a CEDIS y a cliente de tres a cinco veces por semana de acuerdo al plan de producción, y a su vez, del CEDIS se envía producto terminado a cliente de tres a cuatro veces por semana, de igual manera, de acuerdo al plan de producción del cliente.

Se tiene establecido dejar una caja con cada uno de los dos clientes por un día en lo que es descargada, por lo que, se tienen disponibles solamente tres cajas para la distribución del producto. Si se envía producto a uno de los clientes se realiza el cambio de caja y el chofer se lleva la caja vacía. Con los proveedores, el chofer se espera en ese punto hasta que la caja es cargada o descargada. Si alguna de las cajas no se utiliza, se puede dejar en la planta esperando a ser utilizada.

La planta es la encargada de planear el abastecimiento y distribución de todos los productos, el momento de la entrega, el tamaño del lote y la ruta que sigue el chofer.

### 3.3 PROBLEMA DE RUTEO DE INVENTARIOS IRP

El problema que se aborda con esta investigación, se considera como un IRP dentro de una red de cadena de suministro que integra múltiples proveedores que abastecen de materia prima a un depósito central que es la planta y ésta a su vez, envía producto terminado a dos clientes; combinando de manera integral la distribución óptima con el manejo de inventarios.

En la revisión de la literatura explicada en el capítulo anterior, no se ha encontrado una solución a un problema semejante con las mismas premisas al que se tiene actualmente, por lo que, se planea la modificación o integración de soluciones que se presentan en problemas semejantes.

A pesar de que algunos algoritmos de programación lineal muestran una solución exacta, es difícil desarrollar un algoritmo que resuelva el problema de ruteo de inventarios en un tiempo polinomial al ser un problema de tipo **NP-hard**, por lo que, en problemas más complejos con un mayor número de nodos, es necesaria la utilización de heurísticas que logren el mejor resultado con un esfuerzo computacionalmente razonable para este tipo de problema con aplicaciones prácticas (Nambirajan *et al.*, 2016).

Las propuestas de solución revisadas en la literatura, consisten generalmente en dividir el problema en dos etapas, la primera etapa resuelve el problema de tamaño de lote de los pedidos de materia prima que se enviará de cada proveedor hacia la planta mediante el algoritmo de Wagner-Whitin. Se toma en cuenta la premisa de que el material que quede como sobrante después de cada periodo de tiempo, se deberá agregar al periodo siguiente.

La segunda etapa consiste en el ruteo del vehículo a través de los nodos para tener como resultado la ruta a seguir.

La solución que se propone en esta investigación consiste en adaptar las dos fases revisadas en la literatura, integrando las características particulares del problema para llegar a la ruta que debe seguir el chofer en su operación diaria, minimizando el tiempo total del viaje.

### 3.3.1 PRIMERA FASE

En la primera parte de la solución, se determina la política de suministro de los proveedores a la planta, con el objetivo de saber el tamaño de lote de los diferentes productos. Este lote se determina con el algoritmo de Wagner-Whitin, el cual ofrece un resultado óptimo. La salida de esta primera etapa son las cantidades de material por enviar a planta para cada uno de los proveedores.

Según Eisenhut (1975), el tamaño de lote es el proceso que determina la cantidad de producto a solicitar y cuándo hacerlo. El objetivo consiste en combinar los requerimientos en órdenes de forma económica, sin exceder el límite de capacidad en cualquier periodo de tiempo.

El algoritmo Wagner-Whitin consiste en evaluar en cada periodo el costo de colocar un nuevo pedido, sumado al costo de la mejor opción del periodo anterior, el cual se compara con las demás opciones, hasta llegar a colocar un pedido por toda la demanda acumulada hasta el periodo actual. Una vez que se tiene el costo de todas las opciones, se elige la de menor costo, la cual se guarda para las siguientes etapas. Una vez que se llega al último periodo, se define la estrategia del mínimo costo para todo el análisis. El costo total es la suma de los costos de cada orden, incluyendo los costos de pedido y costos de inventario. Al ordenar cada producto en cada periodo de tiempo tiene como resultado no tener costos de inventario pero costos por ordenar excesivos, y por el contrario, al ordenar cada producto sólo una

vez durante el horizonte de planeación resulta en costos excesivos de inventario (Taha, 2004).

Cada producto tiene diferentes costos y requerimientos, los cuales varían en cada periodo, por lo cual, podría no ser posible ordenar un lote económico para cada producto en un periodo de tiempo sin exceder la capacidad. El procedimiento del tamaño de lote debe determinar cuánto material solicitar en un periodo y cuánto en los periodos siguientes. Éste no debe solamente considerar los costos relativos de ordenar contra los costos por inventariar cada producto, si no que también debe considerar los requerimientos de cada producto.

Las características que debe de tener un problema para ser abordado por el algoritmo de Wagner Whitin según Federgruen y Tzur (1991), consiste en que debe especificar un periodo de tiempo finito con una demanda conocida para cada periodo, para cada uno de los periodos se debe de elegir enviar una cantidad de material o no enviar. Los parámetros del problema como las demandas, los costos de arranque y los costos por ordenar e inventariar pueden variar entre cada uno de los periodos.

En la revisión de la literatura se ha demostrado que se puede utilizar el algoritmo Wagner-Whitin para determinar los lotes de producto que se envían desde diferentes proveedores o clientes, hasta un depósito central con resultados favorables. Este algoritmo se adapta en esta investigación al tener periodos cortos de planeación, al programar los envíos por 5 días que es la semana laboral en la que se tiene disponible el equipo y al ser una solución óptima al modelo de lote económico.

Por lo cual, se establece como justificación que para el desarrollo de la primera etapa de determinación de lotes, se elige este algoritmo de programación dinámica al tener una metodología que permite llegar a la opción de menor costo del inventario en un tiempo computacional bajo. Este algoritmo permite también implementar gradualmente el tamaño de lote y protege el abastecimiento de material ante la variación de la demanda, esto mediante una hoja de cálculo que permite la utilización de un solver fácil de manejar en la operación diaria con la inversión de poco tiempo.

El procedimiento de este algoritmo permite llegar a la política de menor costo de pedido, de manera que se cubra la demanda a un costo total mínimo. La ecuación para calcular el costo es la siguiente (3.1) basada en ecuación presentada por (Winston y Goldberg, 2005), la cual se resuelve de atrás hacia adelante, comenzando con el periodo  $C_n$  y terminando en el periodo  $C_1$ .

$$C_i = \min_{j \geq i} \{C_{j+1} + K + h \sum_{m=1}^{j-i} md_i + m\} \quad (3.1)$$

donde  $O_1, O_2, \dots, O_n$  es la oferta de los proveedores en cada periodo y  $h$  es el costo por mantener el inventario, el cual se evalúa con respecto al inventario que queda al final del periodo. Y sea  $C_i$  el costo total de la política óptima para todos los periodos desde  $i$  hasta  $n$ , al iniciar  $i$  con un inventario de 0.

Los pasos para la implementación del Algoritmo son los siguientes:

- **Paso 1:** Se considera la política de ordenar en el periodo  $t^{**}, t^{**} = 1, 2, \dots, t^*$  y satisfacer las ofertas  $O_t, t = t^{**} + 1, \dots, t^*$  en ese orden.
- **Paso 2:** Determinar el costo total de las  $t^*$  políticas de pedido, sumando los costos de emisión y almacenamiento asociados a solicitar un pedido en  $t^{**}$  y el costo del óptimo de los periodos 1 y el periodo  $t^{**} - 1$  consideradas por sí mismas.
- **Paso 3:** De las  $t^*$  alternativas, seleccionar la política del costo mínimo del periodo 1 hasta  $t^*$  consideradas de manera independiente.
- **Paso 4:** Continuar al periodo  $t^* + 1$  o detenerse si  $t^* = N$  donde  $N$  es el horizonte de planificación.

### 3.3.2 SEGUNDA FASE

La segunda fase del problema, consiste en determinar el ruteo del vehículo entre los diferentes nodos del grafo, satisfaciendo una serie de restricciones como la oferta y demanda para cada uno de los productos. Esta sección introduce el modelo matemático para el problema de ruteo de inventarios, tomando en cuenta las características del problema en particular.

En la revisión de la literatura se observaron distintos métodos de solución que han aplicado diversos autores para problemas similares de ruteo de inventarios, en este caso, se opta por una heurística al tener resultados cercanos al óptimo en un tiempo computacional razonable, lo que facilita su utilización en la operación diaria de las empresas.

#### 3.3.2.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

A continuación se muestra la notación, los parámetros, las variables de decisión y las condiciones:

CONJUNTOS:

- $K$  Proveedores
- $C$  Clientes
- $E$  Etapas
- $CD$  Planta

SUBCONJUNTOS:

- $I_c$  Agrupa a los clientes en todas las etapas

- $CD_{cc}$  Nodos relacionados cuando se deja una caja en la planta CD
- $CD_{sc}$  Nodos relacionados cuando llega una caja vacía al CD
- $Id_{(K)}$  Nodos de proveedores donde se deja una caja
- $Ip_{(K)}$  Nodos de proveedores donde sólo se pasa
- $Ir_{(K)}$  Nodos de proveedores donde se recoge una caja

PARÁMETROS:

- $cap$  Capacidad de la caja
- $dem_i$  Demanda de clientes
- $Oferta_i$  Oferta de proveedores
- $SS_i$  Inventario de seguridad en la planta CD
- $x_{ij}$  Número de tarimas en la caja que van de  $i$  a  $j$
- $t_{ij}$  Tiempo de  $i$  a  $j$ .

VARIABLES:  $z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si se utiliza el arco de } i \text{ a } j \\ 0 & \text{Si no es así} \end{cases}$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{Si se visita el nodo } i \\ 0 & \text{Si no es así} \end{cases}$$

El problema se formula con programación lineal, donde el objetivo es minimizar el tiempo total del viaje en cada periodo.

Función objetivo

$$\min \sum_{ij} t_{ij} z_{ij} \quad (3.2)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in I_{F1}} z_{0j} = 1 \quad \forall CD_1 \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in I_{F7}} z_{jfin} = 1 \quad \forall CD_{fin} \quad (3.4)$$

$$\sum_j z_{ij} = \sum_j z_{ji} \quad \forall i \in I - \{0, fin\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in I_{D(K)}} y_i = \sum_{j \in I_{R(K)}} y_j \quad \forall K \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in I_{D(K)}} y_i + \sum_{j \in I_{P(K)}} y_j \leq 1 \quad \forall K \quad (3.7)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq cap y_i \quad \forall i \in I \quad (3.8)$$

$$y_i \leq \sum_j z_{ij} \quad \forall i \in I \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in I_{F(E)}} X_{ij} \leq cap \quad \forall E \quad (3.10)$$

$$\sum_{j \in I} X_{ij} = \sum_{j \in I} X_{ji} + Ofertai \quad \forall i \in I \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in I_{CDsc}} \sum_{j \in I_{CDcc}} z_{ij} \leq 3 \quad (3.12)$$

$$\sum_j X_{ji} \geq dem_i + SS_i \quad \forall i \in I_c \cup CD_{cc} \quad (3.13)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (3.14)$$

$$y_{ij}, z_{ij} \in \{0, 1\} \quad (3.15)$$

La función objetivo (3.2) del modelo es minimizar el tiempo total de la ruta entre la planta, los proveedores y clientes. Las restricciones (3.3) y (3.4) determinan que sale un vehículo al CD y entra uno al final. Donde 0 = inicio y fin = nodo final. La condición (3.5) establece que si un vehículo entra al nodo, tiene que salir. La restricción (3.6) limita que al dejar una caja con un proveedor, se tiene que recoger. La condición (3.7) limita que sólo se puede recoger producto una sola vez a cada proveedor, es decir, que al mismo nodo solo se puede pasar o dejar una caja. La condición (3.9) restringe el enviar material sólo si se visita al nodo  $i$ . La restricción (3.10) menciona que para los CD c/c, el material que les llega debe respetar la capacidad del vehículo. La condición (3.11) especifica que los nodos envíen todo el producto que les llega más su oferta. La restricción (3.12) contabiliza el número de cajas que se tienen disponibles. La condición (3.13) es relativa a la demanda. Por último las condiciones (3.14) y (3.15) son relativas a la naturaleza de las variables.

### 3.3.2.2 DESARROLLO DE HEURÍSTICA

En la siguiente gráfica se muestra a detalle el desarrollo de la red de distribución con un ejemplo de 2 proveedores, 2 clientes y un depósito central, en el cual se optó por crear copias de los nodos de proveedores para definir los nodos donde se deja una caja, donde se recoge una caja y los nodos donde sólo se pasa. De igual manera, se crean copias para los nodos del depósito central para definir cuando se llega con caja o sin caja.

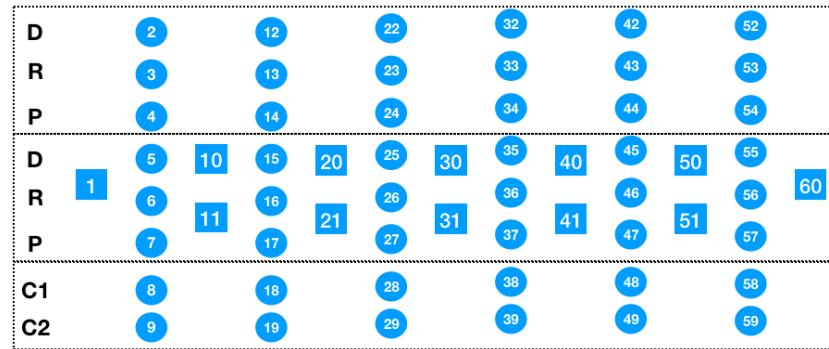


Figura 3.1: Desarrollo de la red de distribución.

A continuación se definen los conjuntos de nodos:

$$Id = \{2, 5, 12, 15, 22, 25, 32, 35, 42, 45, 52, 55\}$$

$$Ip = \{4, 7, 14, 17, 24, 27, 34, 37, 44, 47, 54, 57\}$$

$$Ir = \{3, 6, 13, 16, 23, 26, 33, 36, 43, 46, 53, 56\}$$

$$C1 = \{8, 18, 28, 38, 48, 58\}$$

$$C2 = \{9, 19, 29, 39, 49, 59\}$$

$$CDo = \{1\}$$

$$CDfin = \{60\}$$

$$CDcc = \{10, 20, 30, 40, 50\}$$

$$CDsc = \{11, 21, 31, 41, 51\}$$

Para la implementación de esta metodología se desarrolla una heurística, con la cual se realiza la experimentación de instancias generadas para validar que se cumplan con las restricciones del problema.

A continuación se presenta el algoritmo de la heurística en el cual se especifica el inicio y fin de la ruta en el depósito central, las entradas de oferta y demanda, generadas en la fase anterior de Wagner-Whitin, así como las opciones de ruta que

tiene la unidad cuando se encuentra en un nodo de proveedor, cliente o depósito.

---

**Algorithm 1:** *Búsqueda\_ruta:*

---

```

posición = "depósito";
oferta_actual = oferta;
demanda_actual = demanda;
tiempo = 0;
while oferta_actual  $\geq 1$  o demanda_actual  $\geq 1$  do
    if posición = "depósito" then
        | selecciona_caja;
        | viaje_desde_depósito;
    else
        | terminar_ruteo (no factible);
    if posición = "proveedor" then
        | viaje_desde_proveedor;
    else
        | retorno_proveedor_depósito (destino anterior);
    if posición = "cliente" then
        | viaje_desde_cliente viaje_hacia_depósito;
    else
        | retorno_proveedor_depósito (destino anterior);
terminar_ruteo

```

---

Una vez definida la metodología de ambas etapas, se procede a realizar la experimentación con instancias para el algoritmo de Wagner-Whitin y posteriormente para la heurística.

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

En este capítulo se describe la implementación de la metodología propuesta en este trabajo mediante experimentos computacionales, con el objetivo de evaluar el desempeño de la misma, así como su adaptación al caso real de la empresa.

Este estudio computacional se realizó en las dos fases en las que está dividida la metodología de solución: primero se evalúa el desempeño del algoritmo Wagner-Whitin y después el ruteo del vehículo.

El modelo matemático, el algoritmo Wagner-Whitin y la heurística se evaluaron mediante experimentos computacionales en un equipo MacBook Air con procesador Intel Core i5 con velocidad de 1.6 GHz. La heurística y el algoritmo se programaron en Visual Basic de MS Excel 2010.

### 4.1 INSTANCIAS GENERADAS

Para realizar el proceso de experimentación se validaron ambas fases por separado.

En la primera fase se validó el algoritmo de Wagner-Whitin con instancias de 4 proveedores y 2 clientes, así como información de la oferta de los proveedores y

demandas de los clientes.

En la segunda fase se crearon tres tipos de instancias para validar el desempeño de la heurística con instancias de distintos tamaños.

#### 4.1.1 VALIDACIÓN DE LA PRIMERA FASE

Para validar la adaptación del algoritmo Wagner-Whitin al problema de ruteo de inventarios, se procede con la implementación del algoritmo en una hoja de cálculo, basado en el procedimiento presentado por Evans (1985), el cual es adaptable al considerar la planeación en un  $N$  horizonte de tiempo y con demanda conocida, la cual en este problema se toma como oferta; un costo por ordenar y el costo por inventariar el producto en un periodo  $t$ .

El algoritmo de Wagner-Whitin para la solución de este tipo de problemas de envío de material a un mínimo costo, es normalmente malentendido, ya que se requiere un tiempo computacional grande y otros requisitos de almacenamiento. Con la implementación de Evans (1985) permite una resolución eficiente con un requerimiento bajo de almacenamiento, lo que ayuda en la implementación en cualquier computadora y la persona que lo maneje no necesita grandes conocimientos de esta herramienta, basta con poca experiencia trabajando con hojas de cálculo.

Para determinar la política óptima de envío de materia prima de los proveedores a la planta, se considera la oferta de cuatro productos diferentes, uno para cada proveedor en un periodo de planificación de 5 días equivalentes a una semana de trabajo ( $N = 5$ ). La oferta  $O_t$  de cada uno de los productos es variable, mientras que el costo por solicitud de material ( $K$ ) es fijo \$247 y el costo de inventario  $h$  por cada producto es de \$9.13 por día.

En la tabla 4.1 se muestra la oferta de cada proveedor para cada día de la semana laboral, considerando que cada pieza es una tarima con material. Esta tabla

representa la cantidad requerida para cada producto en cada periodo de tiempo.

	Días				
	1	2	3	4	5
Proveedor 1	13	3	17	5	10
Proveedor 2	10	6	0	0	5
Proveedor 3	4	5	0	7	7
Proveedor 4	8	0	8	0	8

Tabla 4.1: Oferta semanal de proveedores

Los primeros resultados presentados en la tabla 4.2 muestran que para el proveedor 1 se debe considerar el envío a planta de 16 tarimas el día lunes y 32 tarimas el miércoles, esto a un costo total semanal de \$749.64 MXN por ordenar e inventariar el producto en planta.

Periodo	1	2	3	4	5	Piezas
Inventario Inicial	0	3	0	15	10	-
Oferta	13	3	17	5	10	48
Costo por ordenar $K$	\$247	\$247	\$247	\$247	\$247	-
Costo por inventariar $h$	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	-
Cantidad a enviar	16	0	32	0	0	48
Inventario final	3	0	15	10	0	-
Costo total del periodo	\$274.39	\$0	\$383.95	\$91.30	\$0	\$749.64

Tabla 4.2: Envío de producto del proveedor 1 a la planta.

Para el proveedor 2, se tiene como resultado en la tabla 4.3 que se deben enviar 21 tarimas de ese producto a planta el lunes, con un costo total semanal de \$484.38 MXN por la orden realizada y por tener el producto en el inventario de la planta.

Periodo	1	2	3	4	5	Piezas
Inventario Inicial	0	11	5	5	5	-
Oferta	10	6	0	0	5	21
Costo por ordenar $K$	\$247	\$247	\$247	\$247	\$247	-
Costo por inventariar $h$	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	-
Cantidad a enviar	21	0	0	0	0	21
Inventario final	11	5	5	5	0	-
Costo total del periodo	\$347.43	\$45.65	\$45.65	\$45.65	\$0	\$484.38

Tabla 4.3: Envío de producto del proveedor 2 a la planta.

Con el proveedor 3 se muestra en la tabla 4.4 el resultado de hacer dos envíos de producto a planta en la semana, el primer envío en lunes con 9 tarimas y el segundo envío en jueves con 14 tarimas a un costo total semanal de \$603.56 MXN por realizar el pedido e inventariar el producto en planta.

Periodo	1	2	3	4	5	Piezas
Inventario Inicial	0	5	0	0	7	-
Oferta	4	5	0	7	7	23
Costo por ordenar $K$	\$247	\$247	\$247	\$247	\$247	-
Costo por inventariar $h$	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	-
Cantidad a enviar	9	0	0	14	0	23
Inventario final	5	0	0	7	0	-
Costo total del periodo	\$292.65	\$0	\$0	\$310.91	\$0	\$603.56

Tabla 4.4: Envío de producto del proveedor 3 a la planta.

Y por último, los resultados del proveedor 4 que es el CEDIS mostrados en la tabla 4.5, muestran el requerimiento de tres envíos a la semana, el primero el lunes con 27 tarimas, el segundo el martes con 28 tarimas y el tercer envío el jueves con 41 tarimas, esto a un costo total semanal de \$1,005.77 por ordenar e inventariar el producto en planta.

Periodo	1	2	3	4	5	Piezas
Inventario Inicial	0	5	0	0	7	-
Oferta	27	15	13	25	16	96
Costo por ordenar $K$	\$247	\$247	\$247	\$247	\$247	-
Costo por inventariar $h$	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	\$9.13	-
Cantidad a enviar	27	28	0	41	0	96
Inventario final	0	0	8	8	0	-
Costo total del periodo	\$247	\$365.69	\$0	\$393.08	\$0	\$1005.77

Tabla 4.5: Envío de producto del proveedor 4 a la planta.

Una vez que se tienen los tamaños de los lotes óptimos por enviar de cada uno de los proveedores a planta, se procede con la segunda fase para determinar el ruteo del vehículo.

#### 4.1.2 VALIDACIÓN DE LA SEGUNDA FASE

Para evaluar la heurística desarrollada, se generaron instancias de tres tamaños: instancias pequeñas, instancias medianas e instancias grandes.

Tipo	Proveedores	Clientes	Cajas	Tiempo max	Solución	Intentos max*	Cajas en cliente	Oferta	Demanda	Tamaño de ruta
Pequeña	2	2	3	700	196	1	2	1500	2250	7
Pequeña	3	2	5	700	289	1	2	3000	3000	13
Pequeña	3	3	5	700	487	1	2	2499	3750	15
Mediana	4	2	5	700	439	1	2	3332	2500	15
Mediana	6	2	5	700	380	1	2	3750	1874	12
Mediana	8	3	5	700	520	1	2	3632	2043	20
Grande	10	2	5	700	628	1	2	4160	1250	20
Grande	15	4	8	700	657	10	2	6315	2524	27
Grande	20	4	8	700	1001	10	2	6660	2000	35

Las instancias para esta experimentación se generaron con datos aleatorios para validar el funcionamiento de la heurística y el cumplimiento de las restricciones para comprobar la eficiencia del algoritmo que se propone.

#### 4.1.2.1 INSTANCIAS PEQUEÑAS

Para los primeros resultados, se realizaron pruebas de la heurística con instancias pequeñas para asegurar que se cumplieran todas las restricciones. Por lo tanto, se ejecutó una instancia con 3 proveedores, 2 clientes y el depósito central.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con esta instancia.

En la tabla 4.6 se muestra que para este tamaño de instancia se cumplieron las restricciones en 289 min. satisfaciendo una oferta de 3000 piezas y demanda de 3000 piezas. Esto, con un tamaño de ruta de 13, es decir 13 viajes de un punto a otro (nodos).

ID	Origen	Destino	t-inicial	t-final	Tipo viaje	Caja entrada	Cap. caja	Carga actual	Posición	Oferta	Demanda
1	0	1	0	28	dep-cliente	1	2000	500	cliente	3000	3000
2	1	0	28	56	cli-dep	4	0	0	depósito	3000	1500
3	0	2	56	66	dep_proveedor	4	2000	1000	proveedor	3000	1500
4	2	0	66	76	prov-dep	-1	0	0	depósito	2000	1500
5	0	3	76	102	dep_proveedor	3	2000	1000	proveedor	2000	1500
6	3	1	102	133	proveedor_proveedor	3	1000	0	proveedor	1000	1500
7	1	0	133	151	prov-dep	0	0	0	depósito	0	1500
8	0	2	151	192	dep-cliente	4	2000	500	cliente	0	1500
9	2	0	192	233	cli-dep	5	0	0	depósito	0	0
10	0	1	233	251	rdep_prov	0	0	0	proveedor	0	0
11	1	0	251	269	prov-dep	3	0	0	depósito	0	0
12	0	2	269	279	rdep_prov	0	0	0	proveedor	0	0
13	2	0	279	289	prov-dep	4	0	0	depósito	0	0

Tabla 4.6: Instancia pequeña.

En la misma tabla 4.6 se puede observar el punto de origen y destino, el tiempo inicial y final, la posición del nodo final del viaje, así como el consumo de la oferta y la demanda.

#### 4.1.2.2 INSTANCIAS MEDIANAS

Para las instancias medianas se ejecutaron dos tipos, las cuales se presentan a continuación.

En la tabla 4.7 se muestra que para este tamaño de instancia se cumplieron las restricciones en un recorrido de 380 minutos, logrando satisfacer una oferta de 3750 piezas y demanda de 1874 piezas con un tamaño de ruta de 12 viajes.

ID	Origen	Destino	t-inicial	t-final	Tipo viaje	Caja entrada	Cap. de caja	Carga actual	Posición	Oferta	Demanda
1	0	5	0	37	dep_proveedor	1	2000	1375	proveedor	3750	1874
2	5	2	37	58	proveedor_proveedor	1	1375	750	proveedor	3125	1874
3	2	6	58	103	proveedor_proveedor	1	750	125	proveedor	2500	1874
4	6	0	103	130	prov-dep	1	0	0	depósito	1875	1874
5	0	3	130	161	dep_proveedor	3	2000	1375	proveedor	1875	1874
6	3	4	161	185	proveedor_proveedor	3	1375	750	proveedor	1250	1874
7	4	1	185	218	proveedor_proveedor	3	750	125	proveedor	625	1874
8	1	0	218	258	prov-dep	3	0	0	depósito	0	1874
9	0	2	258	302	dep-cliente	2	2000	1063	cliente	0	1874
10	2	0	302	346	cli-dep	5	0	0	depósito	0	937
11	0	1	346	363	dep-cliente	2	2000	1063	cliente	0	937
12	1	0	363	380	cli-dep	4	0	0	depósito	0	0

Tabla 4.7: Instancia mediana.

#### 4.1.2.3 INSTANCIAS GRANDES

De la misma forma, se crearon instancias de mayor tamaño de nodos para validar cómo funciona la heurística con instancias más grandes.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con esta instancia.

En la tabla 4.8 se muestra que para este tamaño de instancia se cumplieron las restricciones en 657 minutos, logrando satisfacer una oferta de 6315 piezas y demanda de 2524 piezas con un tamaño de ruta de 29 viajes.

ID	Origen	Destino	t-inicio	t-fin	Tipo viaje	Caja entrada	Cap. de caja	Carga actual	Posición	Oferta	Demanda
1	0	3	0	18	dep-cliente	1	2000	1369	cliente	6315	2524
2	3	0	18	36	cli-dep	6	0	0	depósito	6315	1893
3	0	1	36	58	dep_proveedor	1	2000	1579	proveedor	6315	1893
4	1	12	58	73	proveedor_proveedor	1	1579	1158	proveedor	5894	1893
5	12	14	73	88	proveedor_proveedor	1	1158	737	proveedor	5473	1893
6	14	15	88	101	proveedor_proveedor	1	737	316	proveedor	5052	1893
7	15	0	101	138	prov-dep	1	0	0	depósito	4631	1893
8	0	4	138	148	dep-cliente	6	2000	1369	cliente	4631	1893
9	4	0	148	158	cli-dep	7	0	0	depósito	4631	1262
10	0	6	158	182	dep_proveedor	2	2000	1579	proveedor	4631	1262
11	6	8	182	199	proveedor_proveedor	2	1579	1158	proveedor	4210	1262
12	8	7	199	227	proveedor_proveedor	2	1158	737	proveedor	3789	1262
13	7	0	227	270	prov-dep	0	0	0	depósito	3368	1262
14	0	2	270	291	dep-cliente	7	2000	1369	cliente	3368	1262
15	2	0	291	312	cli-dep	5	0	0	depósito	3368	631
16	0	4	312	332	dep_proveedor	2	2000	1579	proveedor	3368	631
17	4	11	332	372	proveedor_proveedor	2	1579	1158	proveedor	2947	631
18	11	10	372	388	proveedor_proveedor	2	1158	737	proveedor	2526	631
19	10	13	388	400	proveedor_proveedor	2	737	316	proveedor	2105	631
20	13	0	400	431	prov-dep	2	0	0	depósito	1684	631
21	0	5	431	454	dep_proveedor	1	2000	1579	proveedor	1684	631
22	5	2	454	466	proveedor_proveedor	1	1579	1158	proveedor	1263	631
23	2	9	466	507	proveedor_proveedor	1	1158	737	proveedor	842	631
24	9	7	507	532	rprov_prov	0	0	0	proveedor	421	631
25	7	0	532	575	prov-dep	2	0	0	depósito	421	631
26	0	1	575	599	dep-cliente	3	2000	1369	cliente	421	631
27	1	0	599	623	cli-dep	4	0	0	depósito	421	0
28	0	3	623	640	dep_proveedor	1	2000	1579	proveedor	421	0
29	3	0	640	657	prov-dep	1	0	0	depósito	0	0

Tabla 4.8: Instancia grande.

Esto quiere decir que entre más grandes sean las instancias (con un mayor número de nodos) mayor es la posibilidad de resultados que se obtiene, y puede llevar más tiempo llegar a un mejor resultado, tomando en cuenta que éste tal vez no sea el óptimo.

Las instancias se corrieron con un máximo de tiempo de recorrido de 700 min que es el tiempo en que se encuentra la unidad diariamente en operación.

## 4.2 CASO DE ESTUDIO

Para la experimentación del caso de estudio se utilizaron los datos reales obtenidos como resultado del algoritmo Wagner-Whitin (revisados en la etapa anterior) como datos de entrada para esta etapa.

En la tabla 4.9 se muestra la matriz de tiempos de los proveedores y el depósito, y en la tabla 4.10 los datos de la oferta de cada proveedor para el periodo.

Proveedor	0	1	2	3	4
0	0	90	65	80	75
1	90	0	90	115	105
2	65	70	0	65	65
3	80	100	85	0	60
4	75	95	65	60	0

Tabla 4.9: Matriz de tiempos entre proveedores y depósito.

Proveedor	Oferta
0	0
1	16
2	21
3	23
4	27

Tabla 4.10: Oferta de proveedores.

Por otra parte, en la tabla 4.11 se muestra la matriz de tiempos entre los clientes y el depósito y en la tabla 4.12 la demanda de los mismos.

Cliente	0	1	2
0	0	50	55
1	50	0	35
2	55	35	0

Tabla 4.11: Matriz de tiempos entre clientes y depósito.

Proveedor	Demanda
0	0
1	48
2	48

Tabla 4.12: Demanda de clientes.

En la tabla 4.13 se muestran los resultados obtenidos para la instancia de 4 proveedores, 2 clientes, un depósito central y un vehículo, en un tiempo máximo de recorrido de 700 minutos, que es el horario diario del operador.

La oferta para el material que envían los proveedores a la planta es de 87 tarimas, y una demanda de clientes de 96 tarimas.

La satisfacción de la oferta y de la demanda se realizó en 680 minutos, los cuales están dentro del rango de horario del operador, logrando satisfacer la oferta de los proveedores y la demanda de los clientes.

ID	Origen	Destino	t-inicial	t-fin	Posición	Oferta	Demanda
1	0	2	0	65	proveedor	87	96
2	2	3	65	130	proveedor	66	96
3	3	0	130	210	depósito	43	96
4	0	1	210	260	cliente	43	96
5	1	0	260	310	depósito	43	48
6	0	4	310	385	proveedor	43	48
7	4	1	385	480	proveedor	16	48
8	1	0	480	570	depósito	0	48
9	0	2	570	625	cliente	0	48
10	2	0	625	680	depósito	0	0

Tabla 4.13: Instancia del caso de estudio.

La ruta que da como resultado es:

- Parte de la planta hacia el proveedor 2 y carga, para dirigirse posteriormente al proveedor 3, una vez cargado regresa a la planta.
- De la planta se dirige al cliente 1, realiza cambio de caja vacía por cargada y regresa a la planta a descargar.
- De la planta se dirige al proveedor 4, carga y se dirige al proveedor 1, una vez cargado regresa a planta para descarga.
- Parte de la planta hacia el cliente 2, realiza cambio de cajas vacía por cargada y regresa a la planta a descargar.

Se obtiene como resultado una mejora de 20 minutos sobre el tiempo total del horario de la unidad, cumpliendo en su totalidad la oferta y la demanda del día, erradicando los costos extras que se pagaban anteriormente y haciendo más eficiente el circuito local para la distribución de mercancía de la planta.

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

El problema presentado en el área de logística de la empresa de estudio, es la planificación de rutas locales, por lo cual se adoptó la metodología del algoritmo Wagner-Whitin para determinar el tamaño de lote de la mercancía que va desde cada uno de los proveedores hacia la planta y la programación de una heurística que determina la ruta que sigue el vehículo para la distribución de mercancías, tomando en cuenta restricciones operativas como la capacidad del camión, ventanas de tiempo, etc.

Aplicando esta metodología, se logra cumplir con el objetivo de determinar la ruta que debe seguir la unidad para no desabastecer la planta de materia prima y entregar el producto terminado al cliente a tiempo. Evitando costos extras de distribución como el pago diario de tiempo extra o los altos costos por diésel que la línea transportista presentaba. Teniendo como resultado un aumento en la productividad del recurso y pueda ser utilizado de manera eficiente para la distribución de la mercancía.

Con el paso de los meses, se espera que el métrico de servicio al cliente aumente y se mantenga, ya que se tiene un plan controlado de distribución, maximizando la cantidad de proveedores y clientes visitados y minimizando el porcentaje de viajes no cumplidos.

Como resultado, en algunos días se ha obtenido un ahorro hasta del 10 % en el tiempo total de recorrido, logrando incluir la unidad en otras operaciones y utilizando menor equipo en la empresa. Se espera que este porcentaje aumente, al reducir los pedidos pendientes por no cumplir con las recolecciones de semanas anteriores.

Con la utilización de la heurística se han establecido rutas con una menor distancia total de recorrido y un aumento en el factor de carga de lo que anteriormente se presentaba en la empresa. Logrando también disminuir el gasto del diésel, manteniendo la tarifa de renta con el transportista.

## 5.1 RECOMENDACIONES

La empresa necesita realizar un pronóstico más estándar de su plan de producción, para que sus consumos puedan ser "planchados", es decir, negociar con sus proveedores un plan de entregas fijas por día de la semana y así no modificar la primera etapa de la metodología mencionada en esta tesis que es el algoritmo de Wagner-Whitin, sólo realizar el ruteo del vehículo, cambiando los tiempos en tránsito dependiendo de las condiciones externas a la operación, como condiciones climatológicas u horas pico.

Gestionar la adecuación de esta metodología al TMS que utilizan, para hacer más eficiente el ruteo del vehículo para no seguir utilizando soluciones empíricas; así mismo, desarrollar su plataforma para el fácil acceso y utilización de más usuarios.

Seguir de la mano de los proveedores para minimizar los tiempos de carga del vehículo para lograr realizar más viajes el mismo día e incluir la unidad en otra de las operaciones de la empresa.

Finalmente, se recomienda a la empresa realizar un análisis a sus diferentes procesos de distribución, no sólo locales, sino nacionales e internacionales, ya que herramientas de investigación de operaciones, como las revisadas en esta tesis, ayu-

dan a la optimización de procesos, a lograr un mayor nivel operativo, a minimizar costos logísticos y a marcar la diferencia contra la competencia.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- ARCHETTI, C., M. CHRISTIANSEN y M. G. SPERANZA (2018), «Inventory routing with pickups and deliveries», *European Journal of Operational Research*, **268**(1), págs. 314–324.
- AZADEH, A., S. ELAHI, M. H. FARAHANI y B. NASIRIAN (2017), «A genetic algorithm-Taguchi based approach to inventory routing problem of a single perishable product with transshipment», *Computers & Industrial Engineering*, **104**, págs. 124–133.
- BALLESTEROS SILVA, P. P. y A. ESCOBAR ZULUAGA (2016), «Revisión del estado del arte del problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega (VRPPD)», *Ingeniería y Desarrollo*, **34**(2), págs. 463–482.
- BAÑOS, R., J. ORTEGA, C. GIL, A. L. MÁRQUEZ y F. DE TORO (2013), «A hybrid meta-heuristic for multi-objective vehicle routing problems with time windows», *Computers & Industrial Engineering*, **65**(2), págs. 286–296.
- BATTARRA, M., M. MONACI y D. VIGO (2009), «An adaptive guidance approach for the heuristic solution of a minimum multiple trip vehicle routing problem», *Computers & Operations Research*, **36**(11), págs. 3041–3050.
- BERTAZZI, L., A. BOSCO y D. LAGANÀ (2015), «Managing stochastic demand in an Inventory Routing Problem with transportation procurement», *Omega*, **56**, págs. 112–121.

- CORDEAU, J.-F., D. LAGANÀ, R. MUSMANNO y F. VOCATURO (2015), «A decomposition-based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem», *Computers & Operations Research*, **55**, págs. 153–166.
- DABIRI, N., M. J. TAROKH y M. ALINAGHIAN (2017), «New mathematical model for the bi-objective inventory routing problem with a step cost function: A multi-objective particle swarm optimization solution approach», *Applied Mathematical Modelling*, **49**, págs. 302–318.
- DONG, Y., C. T. MARAVELIAS, J. M. PINTO y A. SUNDARAMOORTHY (2017), «Solution methods for vehicle-based inventory routing problems», *Computers & Chemical Engineering*, **101**, págs. 259–278.
- EISENHUT, P. (1975), «A dynamic lot sizing algorithm with capacity constraints», *AIEE transactions*, **7**(2), págs. 170–176.
- EVANS, J. R. (1985), «An efficient implementation of the Wagner-Whitin algorithm for dynamic lot-sizing», *Journal of Operations Management*, **5**(2), págs. 229–235.
- FEDERGRUEN, A. y M. TZUR (1991), «A simple forward algorithm to solve general dynamic lot sizing models with  $n$  periods in  $O(n \log n)$  or  $O(n)$  time», *Management Science*, **37**(8), págs. 909–925.
- HEMMATI, A., M. STÅLHANE, L. M. HVATTUM y H. ANDERSSON (2015), «An effective heuristic for solving a combined cargo and inventory routing problem in tramp shipping», *Computers & Operations Research*, **64**, págs. 274–282.
- HIASSAT, A., A. DIABAT y I. RAHWAN (2017), «A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products», *Journal of manufacturing systems*, **42**, págs. 93–103.
- LI, K., B. CHEN, A. I. SIVAKUMAR y Y. WU (2014), «An inventory-routing problem with the objective of travel time minimization», *European Journal of Operational Research*, **236**(3), págs. 936–945.

- NAMBIRAJAN, R., A. MENDOZA, S. PAZHANI, T. NARENDRAN y K. GANESH (2016), «CARE: Heuristics for two-stage multi-product inventory routing problems with replenishments», *Computers & Industrial Engineering*, **97**, págs. 41–57.
- PARK, Y.-B., J.-S. YOO y H.-S. PARK (2016), «A genetic algorithm for the vendor-managed inventory routing problem with lost sales», *Expert Systems with Applications*, **53**, págs. 149–159.
- PERES, I. T., H. M. REPOLHO, R. MARTINELLI y N. J. MONTEIRO (2017), «Optimization in inventory-routing problem with planned transshipment: A case study in the retail industry», *International Journal of Production Economics*, **193**, págs. 748–756.
- PETCH, R. J. y S. SALHI (2003), «A multi-phase constructive heuristic for the vehicle routing problem with multiple trips», *Discrete Applied Mathematics*, **133**(1-3), págs. 69–92.
- PROFESSIONALS, C. S. C. M. (2018), «CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary», URL [https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921).
- QIU, Y., J. QIAO y P. M. PARDALOS (2018), «Optimal production, replenishment, delivery, routing and inventory management policies for products with perishable inventory», *Omega*.
- RAYAT, F., M. MUSAVI y A. BOZORGI-AMIRI (2017), «Bi-objective reliable location-inventory-routing problem with partial backordering under disruption risks: A modified AMOSA approach», *Applied Soft Computing*, **59**, págs. 622–643.
- RESTREPO, J. H., P. D. M. VARELA y E. A. C. TREJOS (2008), «Un proble-

- ma logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW).», *Scientia et technica*, **2**(39), págs. 229–234.
- SUAREZ, O. (2013), «Una aproximación a la heuristica y metaheuristicas», *INGE@ UAN-Tendencias en la Ingeniería*, **1**(2).
- TAHA, H. A. (2004), *Investigación de operaciones*, Pearson Educación.
- TOTH, P. y D. VIGO (2002), «An overview of vehicle routing problems», en *The vehicle routing problem*, SIAM, págs. 1–26.
- VANSTEENWEGEN, P. y M. MATEO (2014), «An iterated local search algorithm for the single-vehicle cyclic inventory routing problem», *European Journal of Operational Research*, **237**(3), págs. 802–813.
- WINSTON, W. L. y J. B. GOLDBERG (2005), «Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos», .

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

Ing. Jessica Lizeth Salazar Norato

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

**DESARROLLO DE PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR LA RUTA  
DE DISTRIBUCIÓN Y SUMINISTRO EN UNA EMPRESA DE  
MANUFACTURA**

Nacida en Tampico, Tamaulipas, México el 21 de mayo de 1992. Mis padres José Luis Salazar García y Ma. del Carmen Norato Aradillas. Graduada en 2014 del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero como Ingeniera Industrial. Actualmente Coordinadora de tráfico en una empresa de la región de Monterrey dedicada a la fabricación de baterías.