

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño de un modelo de ruteo vehicular con consideraciones de inventario para una empresa dedicada a la generación y distribución de líquidos criogénicos desde sus plantas ubicadas en la ciudad de Guayaquil y Sillunchi.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Logística y Transporte

Presentado por:

Marcos Antonio Jaramillo Alava

Juan Francisco Salame Rodríguez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a Marcos, mi Padre, que desde el cielo me acompañó y me sigue dando aliento para no desmayar en la vida y a Mathias, mi amado hijo, que me inspiró a demostrarle que las metas siempre se logran con esfuerzo.

Marcos Jaramillo Alava

Dedico este proyecto a todas las personas que en algún momento formaron parte de mi vida, que desearon ver este objetivo cumplido y que ya no están conmigo para disfrutarlo.

Lo dedico también a mi esposa y mis hijos quienes fueron mi motor y mi motivación para jamás desfallecer y dar todo de mí.

Juan Salame Rodriguez

AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento a Dios, mi familia, mis amigos y profesores que no me permitieron desfallecer en este camino y me alentaron día a día.

Marcos Jaramillo Alava

Agradezco al profesor Carlos Ronquillo por nunca desistir en que tome la materia integradora, creo que fue en el momento apropiado para poder culminar un objetivo que tenía pendiente de finalizar desde algunos años atrás antes de empezar a trabajar.

Agradezco a mi profesor de la materia integradora Profesor David De Santis y a nuestro tutor Carlos Martin por guiarnos siempre por el camino correcto durante el desarrollo de nuestro proyecto integrador.

A mi madre por siempre inculcar buenos valores, responsabilidad y darme fuerzas en los momentos más duros de mi vida.

Juan Salame Rodríguez

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Marcos Jaramillo y Juan Salame damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Marcos Jaramillo Alava



Juan Salame Rodríguez

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**DAVID ANTONIO
DE SANTIS
BERMEO**



Firmado
digitalmente por
**CARLOS
MANUEL MARTIN
BARREIRO**

MSc. David De Santis Bermeo
PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Carlos Martin
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El diseño estratégico en el proceso de distribución en un mundo globalizado se torna vital para mantener los niveles de servicio y costos operativos en un alcance que garantice la rentabilidad de las ventas y es aquí donde surge la necesidad de, con ayuda de herramientas matemáticas, establecer vías que permitan optimizar los procesos, siendo la distribución uno de los rubros que mayor variación presentan dentro de los ingresos netos de una empresa (alrededor del 14.7% en LATAM).

Para el caso de estudio, se trata de una empresa dedicada a la producción, almacenamiento y distribución de líquido criogénico en la ciudad de Guayaquil y Sillunchi, sin hacer uso de planificación y asignación de rutas que garantice que los viajes sean óptimos, es decir esto se realiza de manera empírica, asignando los clientes a viajes y recursos solo con la observación de como fluctúa la demanda con el día a día.

Para brindar una solución, se empleó un modelo matemático de ruteo vehicular con inventario (Inventory Routing Problem), aplicando herramientas estadísticas que determinaron los datos necesarios para que el modelo se ajustara al problema y con la ayuda de software GAMS, se encontró una solución para un horizonte de planificación determinado.

Una vez obtenidos los resultados se evidencio que, con las frecuencias obtenidas con la implementación del modelo, se puede generar un ahorro estimado de aproximadamente el 13% en el costo semanal de transporte y almacenamiento. Adicional, se sistematiza el proceso de planificación haciéndolo dinámico y adaptable en el tiempo.

Palabras clave:

IRP: Inventory Routing Problem, por sus siglas en inglés, problema de ruteo vehicular considerando niveles de inventario en clientes y planta dentro de sus restricciones.

Cisterna Criogénica: Contenedores con aislamiento de diferentes capacidades diseñados para almacenar y transportar líquidos a temperaturas de $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Planificación Empírica: Proceso basado netamente en el conocimiento y la experiencia de los comportamientos de datos sin hacer uso de herramientas académicas.

Horizonte de Planificación: Periodo de tiempo de corto, mediano o largo plazo utilizado para ejecutar procesos de diferente índole, en este caso, procesos operativos.

ABSTRACT

The strategic design in the distribution process in a globalized world becomes vital to maintain service levels and operating costs in a range that guarantees the profitability of sales and this is where the need arises, with the help of mathematical tools, to establish ways that allow optimizing processes, with distribution being one of the items that present the greatest variation within the net income of a company (around 14.7% in LATAM).

For the case study we take a company that is dedicated to the production, storage and distribution of cryogenic liquid in the city of Guayaquil and Sillunchi, which doesn't have a planning and route assignment system that guarantees that trips are optimal, meaning this is done empirically, assigning clients to trips and resources only by observing how demand fluctuates from day to day.

To provide a solution, a mathematical model of inventory Routing Problem was used, applying statistical tools that determined the necessary data for the model to fit the problem and with the help of GAMS software, a solution was found for a given planning horizon.

With the achieved results it was evidenced that, with the frequencies obtained with the implementation of the model, an estimated saving of approximately 13% in the weekly cost of transport and storage can be generated. Additionally, the planning process is systematized, making it dynamic and adaptable over time.

Key words

IRP: Inventory Routing Problem, vehicle routing problem considering inventory levels in customers and plants within their restrictions.

Empirical Planning: Process based purely on the knowledge and experience of data behaviors without using academic tools

Cryogenic Tank: Insulated containers of different capacities designed to store and transport liquids at temperatures of $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$

Planning Horizon: Short, medium or long-term period of time used to execute processes of different kinds, in this case, operational processes.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	III
ÍNDICE GENERAL	V
ABREVIATURAS	VIII
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO	1
.....	12
1.1 Introducción.....	12
1.1.1 Descripción del problema	14
1.1.2 Justificación del problema.....	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo General.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
1.3 Marco teórico.....	20
1.3.1 Problema de ruteo de Vehículos (VRP)	20
1.3.2 Variantes del problema de ruteo vehicular.....	22
1.3.3 Generalidades del IRP.....	24
CAPÍTULO	2
.....	25
2.1 Metodología.....	25
2.2 Levantamiento de la Información.....	27
2.2.1 Situación actual	27

2.2.2	Recopilación de los datos	29
2.3	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS.....	33
2.4	Formulación del modelo	34
2.4.1	Conjuntos principales.....	34
2.4.2	VARIABLES DE DECISIÓN.....	35
2.4.3	Modelo Matemático.....	35
2.5	Esquema de rutas para Oxígeno Zona Norte y sur	39
2.5.1	Modelo Matemático.....	39
2.6	Esquema de rutas para Nitrógeno y Dióxido de Carbono	41
2.6.1	Modelo Matemático.....	41
2.7	USO DEL SOFTWARE	43
2.8	CONSIDERACIONES ETICAS Y LEGALES	44
2.9	Fases del proyecto	44
2.10	CRONOGRAMA DE TRABAJO.....	45
CAPÍTULO		3
.....		46
3.1	Resultados y análisis.....	46
3.2	Análisis computacional.....	52
3.3	Propuesta de distribución de productos.....	57
3.3.1	Propuesta de distribución Dióxido de Carbono	57
3.3.2	Propuesta de distribución Nitrógeno	59
3.3.3	Propuesta de distribución Oxígeno Zona Norte	61
3.3.4	Propuesta de distribución Oxígeno Zona Sur	61
3.4	Propuesta de distribución de productos.....	63
CAPÍTULO		4
.....		64

4.1	Conclusiones Y Recomendaciones	64
4.2	Conclusiones.....	64
4.3	Recomendaciones.....	64
	BIBLIOGRAFÍA.....	66

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CO ₂	Dióxido de Carbono
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
GAMS	Sistema General de Modelamiento Algebraico
ISO	Organización Internacional de Normalización

SIMBOLOGÍA

Kg	Kilogramo
mg	Miligramo
Tn	Tonelada
Km	Kilómetro
\$	dólar

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1 Metodología y proceso a seguir	26
Figura 3.1.1 Capacidad de almacenamiento.....	50
Figura 3.1.2 Clientes y los subtours.....	51
Figura 3.1.3 Clientes y los subtours.....	51
Figura 3.1.4 Resultados de modelo matemático implementado.....	52
Figura 3.2.1 Valor óptimo de los clientes por zona	54
Figura 3.2.2 Instancia de CO2.....	55
Figura 3.2.3 Instancia Nitrógeno.....	55
Figura 3.2.4 Instancia oxígeno zona norte.....	56
Figura 3.2.5 Instancia oxígeno zona sur	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1 Demanda y capacidad de oxígeno zona sur (en Kg)	30
Tabla 2.2.2 Demanda y capacidad de Nitrógeno por semana (en Kg)	30
Tabla 2.2.3 Costo de transporte del producto Nitrógeno en \$	31
Tabla 2.2.4 Costo de transporte del producto CO2 en \$.....	31
Tabla 2.2.5 Costo de transporte del producto Oxígeno de la zona norte \$.....	32
Tabla 2.2.6 Costo de transporte de Producto Oxígeno de la zona sur en \$.....	32
Tabla 2.2.7 Costo de producción de Productos en \$	32
Tabla 2.2.8 Costos de transporte de Productos en \$/Km	33
Tabla 2.2.9 Capacidad de flota en Kg	33
Tabla 2.10.1 Cronograma de actividades desarrollado durante el proceso.....	45
Tabla 3.1.1 Nivel de inventario que arroja el modelo	47
Tabla 3.1.2 Consumo del cliente i en el periodo t.....	48
Tabla 3.1.3 Modelo en acción determinando si enviar los productos al cliente	49
Tabla 3.3.1 Demanda de los clientes del Producto CO2	57
Tabla 3.3.2 Capacidad de clientes de CO2.....	58
Tabla 3.3.3 Resultados Obtenidos - Demanda de Clientes del Producto CO2.....	58
Tabla 3.3.4 Situación Actual – Demanda de Clientes del Producto Nitrógeno	59
Tabla 3.3.5 Capacidad de almacenamiento clientes de Nitrógeno	60
Tabla 3.3.6 Propuesta de distribución Nitrógeno	60
Tabla 3.3.7 Propuesta de distribución Oxígeno Zona norte.....	61
Tabla 3.3.8 Propuesta de distribución Oxígeno Zona sur	61
Tabla 3.3.9 Utilización de la flota	62
Tabla 3.3.10 Productos y los costos de la propuesta.....	62
Tabla 3.4.1 Costos de producción y transporte de enero a julio del presente año	63
Tabla 3.4.2 Sistema de distribución y sus costos	63

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

A nivel mundial, existen varias estrategias de negocio y financieras que cada empresa busca implementar para conseguir ser más competitivos y en el desarrollo industrial, ser eficiente se vuelve fundamental al momento de considerar los costos operativos. Como mención relevante, existe una práctica basada en la administración de los inventarios, tanto propios y del cliente, por parte del proveedor.

Esta estrategia es denominada Inventario administrado por el proveedor “Vendor Managed Inventory” (VMI) bajo sus siglas en inglés. De acuerdo a lo mencionado por los autores Campbell, Clarke, Kleywegt & Salvendy (1997), el VMI se basa en una estrategia de logística de distribución en la que los proveedores son los responsables del reabastecimiento de los niveles de inventario de sus clientes.

Este se contrasta con la gestión de inventario convencional en la que los clientes controlan sus propios niveles de inventario y hacen pedidos cuando creen que es el momento adecuado para volver a pedir.

De este modo, el cliente no realiza solicitudes de pedido de stock al proveedor y los niveles de inventarios se manejan de forma más eficiente, de acuerdo a los productos administrados. Bajo estas premisas, el proveedor se hace responsable de evitar el desabastecimiento de sus clientes.

Implementar la modalidad VMI representa muchas ventajas para ambos actores, y como para mencionar la ventaja más relevante de esta estrategia es la facilidad con la que se realiza la administración del inventario. Como evidencia de esta ventaja es que los encargados de realizar la planificación o control de inventario, reducen de manera

considerable las veces en las que se realiza esta verificación y con este ahorro, optimizar las horas hombre.

Otro punto de mejora identificado se traduce en que ya no es necesario mantener un nivel de stock elevado para poder satisfacer la demanda de los clientes. Los niveles de inventario se reducen y esto es traducido en reducción de costos y optimización de uso de flota, con respecto al proveedor.

Las ventajas mencionadas para el cliente se evidencian en mejora en los niveles de servicio, medidos en términos de confiabilidad de la disponibilidad del producto, debido al hecho de que los proveedores pueden usar la información que recopilan sobre los niveles de inventario de los clientes para anticipar mejor la demanda futura y suavizar de manera proactiva los picos en la demanda. Se adiciona también el hecho de que se mitiga el efecto látigo debido a la minimización de imprecisión en la estimación de la demanda, por parte de cada miembro de la cadena de suministro cuando hay fluctuaciones en los volúmenes de los pedidos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar métodos eficientes para ayudar al proveedor a tomar buenas decisiones al implementar VMI. En muchas aplicaciones de VMI, el proveedor gestiona una flota de vehículos para transportar el producto a los clientes. El objetivo del proveedor es coordinar el reabastecimiento de inventario y el transporte de tal manera que el costo total se minimice a largo plazo. El problema de la coordinación óptima del reabastecimiento y el transporte del inventario se denominan problema de enrutamiento del inventario (IRP).

En el trabajo realizado por Saltos & Aceves (2012) existe una propuesta del modelo base del problema de ruteo vehicular con inventarios en el que se considera un conjunto de clientes y un centro de distribución central a partir del cual, se determinarán las mejores rutas por asignar, con su debido nivel de inventario a enviar y a mantener en el almacén, para cada instante de tiempo, enmarcado en el horizonte de planificación definido.

Específicamente, estudiamos el problema de determinar políticas óptimas para la distribución de varios productos de un solo proveedor a múltiples clientes. Se supone que las demandas de los clientes tienen distribuciones de probabilidad conocidas por el proveedor.

1.1.1 Descripción del problema.

A nivel mundial los costos logísticos forman parte de unos de los porcentajes más elevados dentro del presupuesto de grandes, medianas y pequeñas empresas, por ejemplo, tan solo en Estados Unidos y la Unión europea representan el 8.7% y 11.9% de los ingresos netos de las industrias. Dado que el transporte terrestre representa el 74% del transporte utilizado para el traslado de mercancías a nivel mundial, esta muestra un crecimiento anual de entre el 0.35 y 0.4% anual de ingresos para empresas dedicadas a este rubro.

Tan solo en LATAM el porcentaje de este costo con respecto a los ingresos netos corresponden al 14.7%, en contraste con los datos de las demás regiones a nivel

mundial, a pesar de que las condiciones geográficas y tecnológicas no son las mismas existe una gran oportunidad para disminuir estos costos.

En Ecuador luego de la liberación del precio de los combustibles, las tarifas de fletes de transporte de carga pesada se han incrementado en un 12.74% con el aval del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, lo cual ralentiza la recuperación económica del país luego de 2 años de pandemia.

El incremento del 83% en el precio por galón del Diesel ha agravado aún más la situación ya que para que las operaciones sean sustentables, muchas empresas prestadoras de servicios de transporte han incrementado sus tarifas de acuerdo con sus aspectos contractuales.

Es aquí donde surge la necesidad de establecer un método para disminuir los costos asociados a la distribución de mercaderías. La empresa en la cual basamos este trabajo, realiza su planificación bajo ningún análisis previo de demanda y en muchos casos, sin ayuda tecnológica de enrutadores que manejan algoritmos de eficiencia en tiempo o distancia, provocando que sus planificaciones se vean afectadas por diversos factores geográficos y urbanos que no se toman en cuenta previo a la realización de los viajes.

El caso de estudio propuesto se centra en la distribución de cisternas criogénicas cuyas capacidades oscilan entre los 18,000 y 26,000 Kg, dependiendo del producto que se va a transportar (Oxígeno, Nitrógeno, Dióxido de Carbono). Estas cisternas son propias de la empresa, sin embargo, se subcontrata el uso de recursos para sostener la operación como: cabezales, personal operativo y personal administrativo.

En su mayor parte, cada cliente y cada vehículo se asignan a una planta específica, de modo que el problema general se descompone en subproblemas asignados a cada planta de manera individual. Además, para mejorar la seguridad y reducir la contaminación, cada vehículo y cada tanque de almacenamiento de un cliente está dedicado a un tipo particular de producto. Por lo tanto, el problema también se descompone según el tipo de producto. Se supondrá que los vehículos y los conductores están disponibles al comienzo de cada día, aunque Esto no siempre ocurre en la práctica y esa consideración la propondremos para un futuro caso de estudio.

Se da por hecho que el proveedor conoce las distribuciones de probabilidad de las demandas de los clientes y que no cambian con el tiempo. Para este caso particular, se dispone de una gran cantidad de datos y las características de la demanda de los consumidores, no varían en el horizonte de planeación.

Un producto se distribuye desde las instalaciones del proveedor a varios clientes, utilizando una flota homogénea de vehículos, cada uno de capacidad conocida. El proceso se modela en tiempo discreto, es decir $t=0, 1, 2, \text{etc.}$, y este periodo es denominado "días"

Las demandas de los clientes son constantes y depende de su tasa de consumo diaria. La distribución de probabilidad de demanda es conocida por el proveedor. El proveedor puede saber el nivel de inventario de cada cliente en cualquier momento. En cualquier momento del día, el proveedor toma una decisión con respecto a qué inventarios de clientes reabastecer, cuánto entregar en cada cliente, cómo combinar

clientes en rutas de vehículos y qué rutas de vehículos asignar a cada uno de los vehículos.

El conjunto de decisiones factibles está determinado por las siguientes restricciones:

- Los tiempos de viaje y trabajo por horas de vehículos y conductores.
- Se considera ventanas de tiempo de entrega a los clientes
- Los niveles máximos de inventario y los niveles actuales de inventario de los clientes y otras restricciones dictadas por la aplicación de la empresa en particular.
- Los vehículos salen de un depósito y deben regresar al punto de partida al finalizar el viaje.
- La capacidad de los vehículos es limitada.
- Los clientes deben ser visitados una sola vez y satisface su demanda.
- La demanda de los clientes es conocida.

Tomando estas restricciones en cuenta, suponemos que el analista de distribución puede determinar, para cualquier subconjunto dado de los clientes, si existe una ruta factible que visite a todos los clientes del subconjunto. También hay una cantidad máxima del producto que puede estar en cada cliente. Este valor máximo puede deberse a limitaciones de capacidad de almacenamiento en los clientes. En algunas definiciones de VMI, a menudo existe un límite contractual de capacidad, acordado por el cliente y el proveedor, y esta está ligada a las especificaciones técnicas del fabricante del reservorio de producto (generalmente es el 90%)

Puede ser factible que un vehículo realice más de una ruta por día. Suponemos que la duración de las actividades de un conductor, que son la de cubrir una o varias rutas no podrá exceder el tiempo máximo de trabajo estipulado por la ley, por lo que todos los vehículos y conductores son disponible al comienzo de cada día, cuando se asignan las tareas para ese día.

El costo de cada ruta es conocido por el proveedor. Esto incluye los gastos de viaje de la red de distribución, que también puede depender de la cantidad de producto transportado a lo largo del viaje.

A menudo existe una probabilidad de que un cliente se quede sin stock de los líquidos criogénicos. Se apunta que la escasez se minimice debido a una penalización si la demanda es insatisfecha el día que se realiza la entrega la cliente. La demanda insatisfecha se trata como demanda perdida y no se acumula.

1.1.2 Justificación del problema

Una vez expuesta la situación actual, el estudio y análisis de los datos de demanda, producción, capacidades, etc. De este problema se enfocará en proponer un modelo matemático que, con base a las restricciones expuestas, ayude en la asignación de recursos y clientes a viajes de manera que se minimice el tiempo de cada ruta, los tiempos de planificación y garantice el correcto abastecimiento de los clientes y disminuir el riesgo que paren su producción o, más grave aún, evitar que clientes centros de salud y hospitales pierdan su flujo de oxígeno hacia sus pacientes.

Este modelo tendrá en cuenta los puntos de reorden en cada cliente y los tiempos de viaje hacia las zonas donde se encuentran y contará con una alimentación en tiempo real para automatizar el proceso de planificación diaria, lo cual brindará un mayor panorama de análisis a las supervisiones del área, generando ahorro evitando las solicitudes de recursos adicionales para sostener la operación y automatizando el proceso de planificación, evitando así la variación por cambios de último momento en las rutas en el instante en que se están ejecutando.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Establecer el diseño de la programación de rutas de las entregas de cisternas de líquidos criogénicos generados desde dos centros de distribución hacia los lugares de destino de los clientes, utilizando un modelo de ruteo vehicular que tenga dentro de sus cálculos el nivel de inventario, con la finalidad de reducir los costos operativos asociados a la distribución.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar un diagnóstico de los factores críticos en cada centro de distribución de cada producto hacia los puntos de los clientes considerando sus inventarios, restricciones de capacidad vehicular, flota y demanda de materia prima.
2. Realizar un análisis de planificación de la demanda para establecer patrones que ayuden en la elaboración del modelo propuesto.
3. Formular e implementar el modelo de solución considerando el problema de ruteo de vehículos considerando inventario según las características propias

del proceso y que maximice los niveles de servicio y satisfacción de los clientes sin perder el objetivo de minimizar los costos de distribución

4. Desarrollar un análisis de costos que evidencie la situación actual de la empresa versus la mejora a implementar.

1.3 Marco teórico

Una de las decisiones más importantes en cualquier operación que tenga relación con la distribución en la cadena de abastecimiento es el ruteo y el scheduling de los pedidos. Tanto supervisores como planificadores deben decidir la secuencia en que un vehículo en particular realizara las visitas a cada cliente.

Una vez enviada las solicitudes de pedidos de clientes, el objetivo es planificar y establecer las secuencias de los vehículos para la distribución con la finalidad de que los costos generados sean mínimos. Establecer una combinación adecuada en la secuencia de entrega ayuda a encontrar el tamaño óptimo de la flota de vehículos, la distancia total recorrida y el tiempo total de viaje disminuyendo fallos en el nivel de servicio como consecuencia de retrasos en las entregas.

1.3.1 Problema de ruteo de Vehículos (VRP)

El problema de ruteo vehicular con recolección y entrega fue planteado por primera vez en 1989 por H. Min, considerando la posibilidad de recogidas y entregas simultáneamente en el mismo nodo, bajo este concepto, se desprende que el objetivo general del problema es buscar y encontrar una secuencia factible de entrega con un número fijo de vehículos y con los costos más bajos posibles. Esta secuencia debe

garantizar el cumplimiento de la planificación establecida sujeto a las restricciones y requerimientos de capacidad necesaria para el transporte de los bienes a cada cliente.

El VRP como tal es considerado un problema NP-Completo ya que no se puede encontrar una solución óptima en tiempo polinómico y muchos de estos problemas muy probablemente no formen parte de la clase de complejidad P. Debido a su complejidad, surge la necesidad del análisis de este tipo de problemas a través del uso de métodos aproximados como lo son la Heurística y las Metaheurísticas.

Para modelizar este tipo de problemas, la flota de vehículos debe ser homogénea o heterogénea, dependiente de la capacidad con la que se cuente y a su vez guarde relación con las características de los bienes a transportar y que también tenga relación con los costos fijos y variables como combustible y distancia, pudiendo ser estos iguales o diferentes respectivamente. En el caso de un problema de VRP con flota heterogénea se asume que la flota difiere entre sí, por ejemplo, tipo de vehículo, capacidad, vida útil, etc.

Adicional a las restricciones de capacidad y características de la flota el modelo requiere que se incluya otros datos básicos como los requerimientos de los clientes, mismos que cuentan con una demanda preestablecida que debe ser cubierta con la flota de vehículos, que debe partir y retornar al mismo depósito.

Con base a lo expuesto, el VRP se define como la distribución de una flota de vehículos que parten de un depósito con el fin de satisfacer una demanda solicitada por un cliente, estos de manera gráfica pasan a ser los nodos del grafo. Los arcos que unen a cada vértice representan costos variables, la capacidad de los vehículos se va

reduciendo con la demanda en cada uno de los vértices de tal manera que la capacidad del vehículo no debe sobrepasarse en el recorrido.

Para encontrar una solución factible al problema VRP se utilizan dos tipos de métodos, los métodos exactos, descritos por algoritmos de acotamiento y ramificación y los métodos aproximados, mismos que, aunque no brindan una solución exacta, generan un conjunto de soluciones factibles que se acercan a la solución óptima y permiten evaluar una mayor cantidad de variables y establecer escenarios más apegados a la realidad. Estos algoritmos son clasificados como heurísticas de Búsqueda Local y metaheurísticas como: GRAPS, Recocido Simulado y Algoritmo Genético, entre otros

1.3.2 Variantes del problema de ruteo vehicular

De acuerdo con las características y restricciones que contenga el escenario de estudio se pueden diferenciar los siguientes sistemas:

CVRP – VRP Capacitado: con el supuesto principal de que cada vehículo no puede cargar más de lo que le permita su capacidad y cada viaje inicia y termina en el depósito.

MDVRP – VRP con depósitos múltiples: se cuenta con más de un depósito ubicados estratégicamente en una región.

PVRP – VRP Periódico: el horizonte de planeación de las rutas es mayor a un día, de tal manera que un conjunto de clientes debe ser abastecido más de una vez en un periodo de tiempo determinado, esto permite optimizar el número de vehículos que se necesitan y el tiempo de cada viaje.

SD VRP – VRP con entrega dividida: el número de vehículos que realiza el abastecimiento a un cliente es mayor a uno, con la condición de que el costo se reduzca.

SVRP – VRP estocástico: una o más variables del sistema presentan aleatoriedad, puede ser la demanda, el tiempo de aprovisionamiento o la disponibilidad del cliente.

VRPPD – VRP con entregas y recepciones simultaneas: se presenta cuando un cliente realiza una devolución parcial o total de los bienes por alguna inconformidad o acuerdo previo, como consecuencia se debe planificar un espacio adicional en el vehículo para esta operación.

VRPTW – VRP con ventanas de tiempo: se generan restricciones de intervalos de tiempo de recepción en cada cliente, en este sistema se generan costos adicionales asociados a esperas y retrasos.

VRPB – VRP con red de retorno: los clientes pueden requerir o entregar los bienes, de esta manera se generan dos subconjuntos de clientes internamente en cada viaje, consumidores y vendedores, dando como resultado una distribución mixta, lo cual representa la optimización de los costos asociados.

DCVRP – VRP con restricciones de capacidad y distancia: tanto la capacidad de los vehículos como las distancias representadas en cada arco son limitadas.

OVRP – VRP abierto: los vehículos de la flota no están obligados a retornar al depósito, se presenta cuando la flota es subcontratada y una vez termina el a su base de origen.

MFVRP – VRP con flota mixta: la flota de vehículos es heterogénea, con variaciones de capacidad en cada vehículo y los costos asociados a la distribución de bienes.

VRPF – VRP difuso: surge con la necesidad de establecer demandas, tiempos de viaje y ubicación de clientes desconocidos.

IRP – VRP con rotación de inventarios: el problema consiste en la asignación y distribución de bienes ajustado a la rotación de inventario en el depósito o cliente.

De acuerdo con las características del problema este se puede modelar con alguna de las variantes del VRP, para este caso en específico, de acuerdo a las restricciones el problema se ajusta a un modelo de ruteo con inventarios IRP.

1.3.3 Generalidades del IRP

El IRP es un tema tratado con amplitud en el que existen diferentes artículos, publicaciones e investigaciones que tratan el desarrollo de heurísticas y metaheurísticas con el objetivo de brindar soluciones factibles que surgen en distintas operaciones relativos al ruteo y el nivel de inventario en clientes. El uso de metaheurísticas como Recocido Simulado, métodos GRASP y Algoritmos Genéticos son unos de los más utilizados para la búsqueda de soluciones óptimas a estos problemas. De acuerdo a las características de este problema cuando solo existe un depósito, con un periodo de tiempo y una demanda de una unidad por cliente, este contiene al Traveling Salesman Problem y puede ser categorizado como uno de los problemas NP debido a su complejidad computacional para su resolución.

CAPÍTULO 2

2.1 Metodología

Con base a los conceptos teóricos establecidos en el capítulo que precede, se realizó un diagnóstico mediante el cual se pudo identificar muchos de los factores críticos y cuáles fueron sus características propias de cómo se relacionaban al problema en las operaciones de distribución de mercancías.

Factores como el número de nodos de la red, incrementan considerablemente la complejidad del problema ya que aumenta el número de ecuaciones, variables e iteraciones para encontrar una buena solución con un margen de error aceptable, dado a que este tipo de problemas son difíciles de resolver ya que pertenecen a la categoría NP-complejo. Es aquí donde es vital desarrollar, proponer e implementar modelos matemáticos, algoritmos y metaheurísticas que ayuden en la búsqueda de soluciones factibles.

En esta sección describiremos la metodología usada para la planificación de las rutas del modelo matemático IRP el cual inicia con la recolección y depuración de la data, adicionando la obtención de la matriz de distancias entre los nodos que conforman la red. Con esta información se implementa el modelo matemático en GAMS, produciendo su valor óptimo para la configuración de la red de clientes presentada.

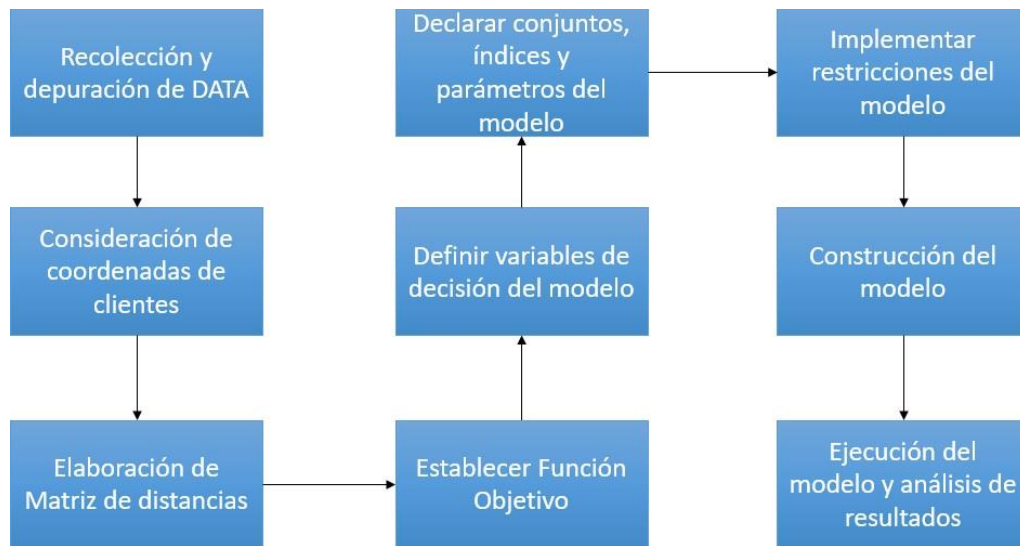


Figura 2.1.1 Metodología y proceso a seguir

La Dra. Claudia Archetti (2011) propone un modelo de ruteo vehicular considerando inventario, tanto en planta como en clientes con horizontes de tiempos discretos donde el objetivo es que la empresa debe cubrir las demandas de los clientes dentro de ese periodo de planeación.

Dentro de las restricciones del modelo constan las limitaciones de que las cantidades a enviar en cada instante de tiempo no sobrepasen la capacidad de almacenamiento en cada cliente, adicional a que el nivel de servicio debe ser tal que, siempre debe garantizar un flujo constante teniendo en cuenta su punto de reorden y este no caiga en desabastecimiento y a su vez las cantidades a enviar no sobrepasen la capacidad de carga del vehículo.

El modelo considera solo un vehículo y el costo variable corresponde a la distancia recorrida desde un nodo hacia otro y al costo de mantener el inventario en planta y en los clientes. La función objetivo es la suma de todos los costos variables, costos de inventario más costos de transporte

2.2 Levantamiento de la Información

2.2.1 Situación actual

Por características propias del problema, se presentan las siguientes consideraciones:

La empresa consta de 10 cisternas para atender la demanda de sus clientes, estas cisternas son de capacidad variable de entre 18 y 26 toneladas, sin embargo 2 de ellas se las utiliza para exportación e importación de producto.

Se consideran dentro de la solución del problema solo los tres productos de mayor rotación (Oxígeno, Nitrógeno y Dióxido de Carbono) no se considera dentro del estudio el Argón debido a que este cuenta con una distribución fija con recursos propios.

Los clientes están distribuidos geográficamente en las tres regiones del Ecuador, sin embargo, para el caso de los clientes dentro de la zona de Guayaquil y Quito, se los considerara como un solo deposito ya que su consumo es estable y conocido y se lo puede abastecer con un solo recurso.

Para la operación, se cuenta con 8 tracto camiones de igual capacidad de arrastre (Kenworth T800).

Los costos de transporte variables corresponden a la distancia recorrida (tarifa de \$*Km) y costo del Diesel por galón, no se toman en cuenta los costos de personal ya que estos son fijos junto con el costo de alquiler de los camiones.

No existe un costo de almacenamiento puesto que la planta de destilación de aire para extraer los productos cuenta con reservorios de entre 260 y 320 toneladas, sin embargo, si hay inmerso un costo de producción por cada producto mismo que es más alto si los tanques se llenan y los reservorios empiezan a ventear producto a la atmosfera, esto se transforma en pérdidas para la compañía.

Por contrato, no hay un costo de mantener el nivel en los clientes ya que es parte del servicio de mantener siempre un flujo constante de producto para las distintas operaciones que efectúan los clientes, ya sea medicinal, metalúrgico o alimenticio.

Cada cliente tiene un nivel de reabastecimiento el cual es el 10% de la capacidad del tanque estacionario, y este se puede llenar solo hasta el 90% debido a que necesita de este espacio para disminuir la presión y evitar pérdidas de producto por venteo.

La demanda de cada cliente es conocida y se establece con base en su producción, esta maneja un patrón conocido y se calcula con la base de datos proporcionada por la empresa.

Para conocer la distancia entre cada cliente y el centro de distribución es necesario el uso de la herramienta Google Maps.

Todos los clientes de la zona norte comprendidas entre la sierra central, amazonia y centro del país (en el caso de Oxígeno) se atienden desde la planta de la competencia, donde se realizó una alianza estratégica para intercambiar producto sin generar un costo adicional y disminuyendo los costos de transporte hacia estos clientes.

Una vez establecidas las consideraciones generales del problema y con la información de los distintos tipos de modelos matemáticos para resolver el VRP y sus variantes se pretende adaptar un modelo matemático ampliado a una flota de varios vehículos, adaptando el modelo básico del IRP propuesto por Archetti et al. (2007).

Cohelo & Laporte (2012) y Adulyasak, Cordeau & Jans (2012), han propuesto extender la formulación del modelo de Archetti et al. (2007) Con base en las políticas Theorder-up level (OU) donde cada cliente define su nivel máximo de operación y el proveedor supervisa que este inventario se mantenga, y The Maximum level strategy (ML) donde cada vez que el cliente es visitado la cantidad que se entrega es tal que alcanza el nivel máximo de su inventario, para brindar una solución al modelo considerando varios vehículos, suponiendo una matriz de costo de transporte simétrica y vehículos con capacidad homogénea.

2.2.2 Recopilación de los datos

Se mantuvo entrevistas con los líderes del proceso para identificar cómo interactúan los recursos. Se detallaron los siguientes aspectos relevantes y críticos de la operación:

➤ Se identificaron los principales productos, de mayor consumo y de mayor valor tales como Oxígeno, CO₂ y nitrógeno los cuales mantienen la siguiente demanda:

Tabla 2.2.1 Demanda y capacidad de oxígeno zona sur (en Kg).

No	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	CAPACIDAD
1	3.000,0	3.000,0	3.000,0	3.000,0	3.000,0	2.000,0	0,0	18.000,0
2	600,0	600,0	600,0	600,0	600,0	0,0	0,0	7.200,0
3	1.400,0	0,0	0,0	0,0	2.100,0	0,0	0,0	5.400,0
4	3.000,0	3.000,0	3.000,0	3.000,0	3.000,0	0,0	0,0	18.000,0
5	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	3.600,0
6	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	4.000,0	3.500,0	36.000,0
7	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	2.700,0
8	1.400,0	0,0	1.800,0	0,0	0,0	0,0	1.000,0	3.600,0
9	1.500,0	0,0	1.000,0	0,0	0,0	0,0	1.000,0	2.700,0
10	1.000,0	0,0	0,0	0,0	1.100,0	0,0	0,0	2.700,0
11	1.400,0	0,0	1.400,0	0,0	1.400,0	0,0	0,0	3.600,0
12	0,0	0,0	0,0	1.200,0	0,0	0,0	0,0	2.700,0
13	1.400,0	0,0	1.500,0	0,0	1.300,0	0,0	0,0	3.600,0
14	0,0	0,0	1.200,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3.600,0
15	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0	0,0	0,0	1.800,0

Tabla 2.2.2 Demanda y capacidad de Nitrógeno por semana (en Kg).

CLIENTE	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	CAPACIDAD
1	3.200,0	3.200,0	3.200,0	3.200,0	3.200,0	0,0	0,0	5.400,0
2	0,0	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0	2.700,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	350,0	0,0	0,0	1.800,0
4	10.000,0	0,0	0,0	10.000,0	0,0	0,0	10.000,0	27.000,0
5	0,0	1.400,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1.800,0
6	0,0	0,0	22.000,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22.500,0
7	1.400,0	0,0	0,0	1.400,0	0,0	1.400,0	0,0	3.600,0
8	0,0	2.500,0	0,0	2.000,0	0,0	1.000,0	0,0	5.400,0
9	800,0	0,0	0,0	600,0	0,0	0,0	0,0	1.800,0
10	0,0	0,0	1.000,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1.800,0
11	4.000,0	0,0	2.500,0	0,0	2.500,0	0,0	0,0	9.000,0
12	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0	0,0	4.500,0
13	0,0	6.000,0	0,0	6.000,0	0,0	0,0	0,0	18.000,0
14	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	81.000,0
15	0,0	0,0	0,0	1.800,0	0,0	0,0	0,0	2.700,0
16	0,0	0,0	1.750,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1.800,0

- Se identificaron los costos de transporte de los diferentes productos, detallados a continuación:

Tabla 2.2.3 Costo de transporte del producto Nitrógeno en \$.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Depósito	65.6	1018.8	77.3	494.2	681.5	892.3	67.9	932.1	934.5	487.1	77.3	934.5	1473.1	82.0	30.4	943.8
1	0.0	943.8	30.4	477.8	615.9	843.1	16.4	918.1	918.1	438.0	28.1	918.1	1456.7	58.6	16.4	927.4
2	1018.8	0.0	929.8	1030.5	320.9	639.4	939.1	18.7	16.4	875.9	946.2	18.7	730.7	939.1	950.9	7.0
3	77.3	30.4	0.0	508.2	641.7	822.0	16.4	957.9	960.2	416.9	23.4	960.2	1487.2	128.8	948.5	969.6
4	494.2	477.8	1030.5	0.0	892.3	1316.2	498.8	1014.1	1011.7	908.7	489.5	1007.1	1400.5	452.0	1002.4	1025.8
5	681.5	615.9	320.9	641.7	0.0	843.1	639.4	302.1	299.8	922.7	651.1	297.4	843.1	644.1	290.4	311.5
6	892.3	843.1	639.4	822.0	1316.2	0.0	812.7	618.3	618.3	433.3	819.7	618.3	1346.7	864.2	606.6	627.7
7	67.9	16.4	939.1	16.4	498.8	639.4	0.0	932.1	929.8	430.9	23.4	943.8	1489.5	135.8	932.1	955.5
8	932.1	918.1	18.7	957.9	1014.1	302.1	618.3	0.0	2.3	857.2	925.1	4.7	744.8	920.4	23.4	14.1
9	934.5	918.1	16.4	960.2	1011.7	299.8	618.3	929.8	0.0	859.5	922.7	7.0	742.4	913.4	28.1	18.7
10	487.1	438.0	875.9	416.9	908.7	922.7	433.3	430.9	857.2	0.0	435.6	854.8	1585.5	480.1	843.1	866.5
11	77.3	28.1	946.2	23.4	489.5	651.1	819.7	23.4	925.1	922.7	0.0	946.2	1477.8	105.4	23.4	934.5
12	934.5	918.1	18.7	960.2	1007.1	297.4	618.3	943.8	4.7	7.0	854.8	0.0	744.8	920.4	23.4	14.1
13	1473.1	1456.7	730.7	1487.2	1400.5	843.1	1346.7	1489.5	744.8	742.4	1585.5	1477.8	0.0	1435.6	747.1	730.7
14	82.0	58.6	939.1	128.8	452.0	644.1	864.2	135.8	920.4	913.4	480.1	105.4	920.4	0.0	882.9	906.4
15	30.4	16.4	950.9	948.5	1002.4	290.4	606.6	932.1	23.4	28.1	843.1	23.4	23.4	747.1	0.0	25.8
16	943.8	927.4	7.0	969.6	1025.8	311.5	627.7	955.5	14.1	18.7	866.5	934.5	14.1	730.7	906.4	0.0

Tabla 2.2.4 Costo de transporte del producto CO2 en \$.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	77.3	838.4	976.6	892.3	929.8	51.5	65.6	63.2	51.5	39.8	248.3	14.1	887.6	871.2	805.6	262.3
1	0.0	882.9	1030.5	936.8	974.3	53.9	58.6	4.7	53.9	42.2	292.8	74.9	936.8	955.5	890.0	543.3
2	838.4	0.0	897.0	400.5	402.8	861.9	873.6	873.6	861.9	850.1	585.5	836.1	395.8	442.6	529.3	576.1
3	976.6	976.6	0.0	496.5	498.8	1014.1	1025.8	1025.8	1014.1	1002.4	1042.2	967.2	494.2	463.7	428.6	1032.8
4	892.3	892.3	400.5	0.0	28.1	901.7	955.5	1016.4	901.7	915.7	658.1	904.0	11.7	103.0	168.6	648.7
5	929.8	929.8	402.8	498.8	0.0	932.1	983.6	1044.5	932.1	908.7	644.1	932.1	28.1	84.3	140.5	292.8
6	51.5	51.5	861.9	1014.1	901.7	0.0	72.6	16.4	0.0	23.4	274.0	63.2	913.4	934.5	873.6	292.8
7	65.6	65.6	873.6	1025.8	955.5	983.6	0.0	42.2	70.3	58.6	288.1	77.3	927.4	946.2	885.3	304.5
8	63.2	63.2	873.6	1025.8	1016.4	1044.5	16.4	0.0	21.1	49.2	299.8	86.7	939.1	955.5	894.6	316.2
9	51.5	51.5	861.9	1014.1	901.7	932.1	0.0	70.3	0.0	23.4	274.0	63.2	913.4	934.5	873.6	292.8
10	39.8	39.8	850.1	1002.4	915.7	908.7	23.4	58.6	49.2	0.0	262.3	44.5	901.7	920.4	859.5	278.7
11	248.3	248.3	585.5	1042.2	658.1	644.1	274.0	288.1	299.8	274.0	0.0	248.3	648.7	665.1	604.2	18.7
12	14.1	14.1	836.1	967.2	904.0	932.1	63.2	77.3	86.7	63.2	44.5	0.0	897.0	868.9	808.0	274.0
13	887.6	887.6	395.8	494.2	11.7	28.1	913.4	927.4	939.1	913.4	901.7	648.7	0.0	1000.0	939.1	358.3
14	871.2	871.2	442.6	463.7	103.0	84.3	934.5	946.2	955.5	934.5	920.4	665.1	868.9	0.0	103.0	669.8
15	805.6	805.6	529.3	428.6	168.6	140.5	873.6	885.3	894.6	873.6	859.5	604.2	808.0	939.1	0.0	613.6
16	262.3	262.3	576.1	1032.8	648.7	292.8	292.8	304.5	316.2	292.8	278.7	18.7	274.0	358.3	613.6	0.0

Tabla 2.2.5 Costo de transporte del producto Oxígeno de la zona norte \$.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	199.1	149.9	206.1	243.6	206.1	154.6	163.9	487.1	248.3	531.6	477.8	121.8	817.4	491.8	632.3	245.9	341.9	337.2
1	0.0	89.0	96.0	119.4	178.0	42.2	140.5	463.7	220.1	719.0	304.5	316.2	599.6	463.7	421.6	220.1	316.2	311.5
2	149.9	0.0	70.3	110.1	138.2	56.2	140.5	426.2	175.7	676.8	341.9	274.0	681.5	421.6	496.5	180.3	274.0	269.3
3	206.1	96.0	0.0	23.4	203.8	77.3	117.1	489.5	245.9	747.1	281.0	344.3	637.0	484.8	452.0	245.9	339.6	334.9
4	243.6	119.4	110.1	0.0	227.2	100.7	128.8	515.2	269.3	714.3	252.9	367.7	660.4	510.6	475.4	269.3	363.0	358.3
5	206.1	178.0	138.2	203.8	0.0	154.6	187.4	288.1	42.2	749.4	477.8	346.6	808.0	288.1	555.1	42.2	135.8	128.8
6	154.6	42.2	56.2	77.3	100.7	0.0	175.7	428.6	185.0	679.2	339.6	276.4	639.4	428.6	456.7	182.7	278.7	274.0
7	163.9	140.5	140.5	117.1	128.8	187.4	0.0	491.8	257.6	726.0	409.9	316.2	726.0	714.3	543.3	245.9	363.0	358.3
8	487.1	463.7	426.2	489.5	515.2	288.1	428.6	0.0	241.2	1023.5	749.4	620.6	1084.3	14.1	491.8	241.2	152.2	145.2
9	248.3	220.1	175.7	245.9	269.3	42.2	185.0	257.6	0.0	777.5	503.5	374.7	843.1	238.9	508.2	2.3	89.0	82.0
10	531.6	719.0	676.8	747.1	714.3	749.4	679.2	726.0	1023.5	0.0	890.0	409.9	1360.7	1016.4	1133.5	770.5	864.2	857.2
11	477.8	304.5	341.9	281.0	252.9	477.8	339.6	409.9	749.4	503.5	0.0	601.9	730.7	749.4	660.4	503.5	599.6	592.5
12	121.8	316.2	274.0	344.3	367.7	346.6	276.4	316.2	620.6	374.7	409.9	0.0	899.3	597.2	730.7	363.0	456.7	447.3
13	817.4	599.6	681.5	637.0	660.4	808.0	639.4	726.0	1084.3	843.1	1360.7	730.7	0.0	1056.2	597.2	810.3	913.4	904.0
14	491.8	463.7	421.6	484.8	510.6	288.1	428.6	714.3	14.1	238.9	1016.4	749.4	597.2	0.0	470.7	241.2	152.2	142.9
15	632.3	421.6	496.5	452.0	475.4	555.1	456.7	543.3	491.8	508.2	1133.5	660.4	730.7	597.2	0.0	508.2	419.2	409.9
16	245.9	220.1	180.3	245.9	269.3	42.2	182.7	245.9	241.2	2.3	770.5	503.5	363.0	810.3	241.2	0.0	89.0	77.3
17	341.9	316.2	274.0	339.6	363.0	135.8	278.7	363.0	152.2	89.0	864.2	599.6	456.7	913.4	152.2	419.2	0.0	14.1
18	337.2	311.5	269.3	334.9	358.3	128.8	274.0	358.3	145.2	82.0	857.2	592.5	447.3	904.0	142.9	409.9	77.3	0.0

Tabla 2.2.6 Costo de transporte de Producto Oxígeno de la zona sur en \$.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	72.6	487.1	288.1	30.4	117.1	140.5	477.8	585.5	482.5	337.2	449.7	435.6	449.7	1058.6	637.0
1	0.0	430.9	278.7	32.8	42.2	93.7	421.6	583.2	426.2	325.5	466.1	412.2	463.7	1058.6	580.8
2	487.1	0.0	728.4	466.1	381.7	491.8	84.3	1007.1	86.7	510.6	871.2	428.6	871.2	1496.5	210.8
3	288.1	278.7	0.0	276.4	327.9	421.6	721.3	829.1	726.0	278.7	763.5	681.5	763.5	1398.2	875.9
4	30.4	32.8	466.1	0.0	86.7	140.5	452.0	632.3	454.3	327.9	489.5	407.5	487.1	1046.9	615.9
5	117.1	42.2	381.7	327.9	0.0	163.9	416.9	655.8	419.2	365.4	522.3	407.5	519.9	1187.4	585.5
6	140.5	93.7	491.8	421.6	140.5	0.0	515.2	655.8	468.4	351.3	538.7	445.0	534.0	1171.0	632.3
7	477.8	421.6	84.3	721.3	452.0	416.9	0.0	1028.1	9.4	505.9	892.3	351.3	890.0	1520.0	175.7
8	585.5	583.2	1007.1	829.1	632.3	655.8	655.8	0.0	941.5	946.2	557.4	777.5	552.7	498.8	1103.1
9	482.5	426.2	86.7	726.0	454.3	419.2	468.4	9.4	0.0	508.2	897.0	353.6	892.3	1527.0	173.3
10	337.2	325.5	510.6	278.7	327.9	365.4	351.3	505.9	946.2	0.0	812.7	733.0	808.0	1445.0	658.1
11	449.7	466.1	871.2	763.5	489.5	522.3	538.7	892.3	557.4	897.0	0.0	730.7	11.7	562.1	1056.2
12	435.6	412.2	428.6	681.5	407.5	407.5	445.0	351.3	777.5	353.6	733.0	0.0	737.7	1245.9	325.5
13	449.7	463.7	871.2	763.5	487.1	519.9	534.0	890.0	552.7	892.3	808.0	11.7	0.0	564.4	1056.2
14	1058.6	1058.6	1496.5	1398.2	1046.9	1187.4	1171.0	1520.0	498.8	1527.0	1445.0	562.1	1245.9	0.0	1688.6
15	637.0	580.8	210.8	875.9	615.9	585.5	632.3	175.7	1103.1	173.3	658.1	1056.2	325.5	1056.2	0.0

- Se identificaron los costos de producción y transporte de los productos: Oxígeno, Nitrógeno y Dióxido de carbono.

Tabla 2.2.7 Costo de producción de Productos en \$.

COSTOS VARIABLES \$/Kg	
COSTO DE PRODUCCION OXIGENO	\$ 0.20
COSTO DE PRODUCCION NITROGENO	\$ 0.13
COSTO DE PRODUCCION DIOXIDO DE CARBONO	\$ 0.12

Tabla 2.2.8 Costos de transporte de Productos en \$/Km.

COSTOS DE TRANSPORTE \$/Km	
TARIFA POR KM RECORRIDO	\$ 2.21
PRECIO DE COMBUSTIBLE	\$ 0.132

- Se identificó la capacidad de la flota propia de la empresa:

Tabla 2.2.9 Capacidad de flota en Kg.

CAPACIDAD DE FLOTA EN Kg	
ST 1	20.000
ST 2	20.000
ST 3	20.000
ST 4	20.000
ST 5	26.000
ST 6	26.000
ST 7	18.000
ST 8	22.000

2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

A continuación, se detallan los supuestos que se deben tener en cuenta al formular el modelo:

- Distribución de un solo producto desde un depósito central hacia el conjunto de clientes dispersos geográficamente dentro de un horizonte de planeación determinado ($T= 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$) donde $T=1$ indica el inicio de la semana y del periodo.
- La demanda es conocida y el nivel del inventario está determinado por la capacidad física de cada tanque estacionario en el cliente.
- Se tiene en cuenta una política de inventario OU.

- El nivel del inventario actual del cliente es conocido al inicio del horizonte de planificación.
- La cantidad de producto a entregar no excede la capacidad de los vehículos asignados a cada viaje.
- Los costos de transporte se conocen simétricos.
- Para la función objetivo se tiene en cuenta los costos asociados al recorrido del vehículo para efectuar la entrega.
- El costo de producción se puede asociar como costo de almacenamiento para disminuirlo al realizar una planificación eficiente.

2.4 Formulación del modelo.

2.4.1 Conjuntos principales

N= conjunto de nodos (i, j), $i=0$ corresponde a la planta.

T= Horizonte de planificación (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

K= Numero de vehículos (1, 2, 3, 4, 5, 6)

Subconjuntos

N'= Subconjuntos de clientes i, $N' \subseteq N$

Parámetros

Nplanta = Nivel inicial en la planta (Oxígeno, Nitrógeno, Dióxido de Carbono)

Ncliente = Nivel inicial del cliente i

C_i = Capacidad de almacenamiento de producto en cada cliente i , $i \in N'$

H = Costo de almacenamiento por tonelada de producto de la planta.

r_t = Producción de la planta en el periodo t , $t \in T$

d_{it} = Consumo del cliente i en el periodo t , $i \in N'$; $t \in T$

Q_k = Capacidad del vehículo

CT_{ij} = Costo de transporte del arco (i, j) , $i, j \in N$

N_{tours} = Número de nodos, debe ser mayor que 2 para considerar todos los subconjuntos de 3 nodos en adelante donde se puedan generar sub tours; $N_{tours} > 2$

2.4.2 Variables de decisión

I_t = Nivel de inventario de la planta al final del periodo t ; $t \in T$

m_{it} = Nivel de inventario del cliente i al final del periodo t ; $i \in N'$ y $t \in T$

q_{ikt} = Cantidad de producto a enviar desde la planta a cada cliente i con el vehículo k en el periodo t ; $t; i \in N'$ y $t \in T$, $k \in K$

U_{ikt} = Variable definida para las iteraciones de N_{tours}

$X_{ijkt} = 1$ si el arco (i, j) es visitado por el vehículo k en el periodo t , 0 si no.

$Y_{ikt} = 1$, si el cliente i es visitado por el vehículo k en el periodo t ; 0 si no; $i \in N'$ y $t \in T$

2.4.3 Modelo Matemático

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^t HI_t + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1; j \neq i}^n \sum_{k=1}^k \sum_{t=1}^t CT_{ij} X_{tjkt} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$I_t = N_{planta} + r_t - \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n q_{ikt}; \forall t \in T (t = 1) \quad (2)$$

$$I_t = I_{t-1} + r_t - \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n q_{ikt}; \forall t \in T (t > 1) \quad (3)$$

$$m_{it} = N_{cliente} + \sum_{k=1}^k (q_{ikt} - d_{it}); \forall i \in N'; t \in T (t = 1) \quad (4)$$

$$m_{it} = m_{it-1} + \sum_{k=1}^k (q_{ikt} - d_{it}); \forall i \in N'; t \in T (T > 1) \quad (5)$$

$$m_{it} \leq C_i \quad \forall i \in N', t \in T \quad (6)$$

$$q_{ikt} \leq C_i Y_{ikt}; \quad \forall i \in N'; k \in K; t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^k q_{ikt} \leq C_i - m_{it-1}; \quad \forall i \in N'; t \in T \quad (8)$$

$$q_{ikt} \geq C_i Y_{ikt} - m_{it-1}; \quad \forall i \in N'; k \in K; t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n q_{ikt} \leq Q_k Y_{Qkt}; \quad \forall k \in K; t \in T \quad (10)$$

$$U_{ikt} - U_{jkt} + N_{nodos} X_{ijkt} \leq N_{nodos} - 1; \quad \forall i, j \in N (i \neq j, i \geq 2, j \geq 2), k \in K; t \in T \quad (11)$$

$$U_{ikt} \leq N_{nodos} - 1 - (N_{nodos} - 2) X_{i1kt}; \quad \forall i \in N (i \geq 2); k \in K; t \in T \quad (12)$$

$$U_{ikt} \leq 1 + (N_{nodos} - 2) X_{i1kt}; \quad \forall i \in N (i \geq 2); k \in K; t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^k Y_{ikt} \leq 1; \quad \forall i \in N'; k \in K; t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n X_{ijk} = Y_{ikt}; \quad \forall i \in N; k \in K; t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ijkt} = \sum_{j=0}^n X_{jikt} ; \forall i \in N; k \in K; t \in T \quad (15)$$

$$I_t \geq 0 ; \forall t \in T \quad (17)$$

$$m_{it} \geq 0 ; \forall i \in N'; t \in T \quad (18)$$

$$q_{ikt} \geq 0 ; \forall i \in N'; k \in K; t \in T \quad (19)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} ; \forall i, j \in N (i \neq j), k \in K; t \in T \quad (20)$$

$$Y_{ikt} \in \{0, 1\} ; \forall i \in N; k \in K; t \in T \quad (21)$$

Las restricciones 2 y 3 corresponden a definir el nivel de inventario de la planta al inicio del horizonte de planificación, es decir, en $T=1$, y para los periodos posteriores, es decir, $T>1$, las restricciones 4 y 5, corresponden a definir el nivel de inventario al inicio del horizonte de planificación en $T=1$ y para los periodos posteriores $T>2$. La restricción 6 indica que la cantidad de producto que se envié no sobrepasé la capacidad del cliente. Las restricciones 7, 8 y 9 corresponden a garantizar que, si decido enviar a un cliente i , lo que se envié más el remanente del inventario en el periodo anterior no sobrepase la capacidad de almacenamiento del cliente. La restricción 10 indica que la capacidad de cada vehículo no se exceda al momento de iniciar el viaje. Las restricciones 11, 12 y 13 ayudan a evitar que se generen subtours en cada instante del horizonte de planeación. La restricción 14 garantiza que, si se decide enviar, el cliente i sea visitado una sola vez en cada periodo. Las restricciones 15 y 16 corresponden al grado de cada nodo, es decir, que si todo lo que ingrese a un cliente salga hacia el siguiente. Las restricciones 17, 18, 19, 20 y 21 garantizan el cumplimiento de la integridad y no negatividad de las variables.

Por características propias del tipo de productos que se manejan para la distribución de líquido criogénico, una cisterna con Oxígeno Líquido no puede llevar ningún otro tipo de producto, por lo que es necesario dividir el modelo para cada caso en específico, además que se consideran 3 puntos de distribución, 1 punto de distribución de Oxígeno en Aloag para abastecer la demanda de los clientes de la zona norte, un punto de distribución de Dióxido de Carbono en Sillunchi y la planta de destilación de aire ubicada en el sur de Guayaquil desde donde se distribuye Nitrógeno Líquido a nivel nacional y Oxígeno a los clientes de la zona sur, como se muestra en la figura 1.

Adicional a esto, todo el conjunto de clientes que consumen Oxígeno tanto de Guayaquil como de Quito se consideran como uno solo, dado a que su demanda puede cubrirse con una sola cisterna en cualquier instante t del periodo de planificación.

Para el caso de estudio, abordaremos el problema desde el siguiente enfoque:

- El problema se subdivide en 4 modelos propios de cada producto y punto de distribución (1 modelo para cada zona de distribución de oxígeno, que brindara una solución para las entregas de este producto, 1 modelo para la distribución de nitrógeno y 1 modelo para la distribución de dióxido de carbono).
- Para el caso de distribución de oxígeno en la zona norte, esta también lleva un costo de producción asociado, ya que, si bien es cierto, se retira de la competencia, la competencia retira de la planta de Guayaquil exactamente la misma cantidad.

2.5 Esquema de rutas para Oxigeno Zona Norte y sur

En ambas zonas se utiliza una sola cisterna para cubrir la demanda de los clientes, por lo que el modelo es el mismo en ambos casos, y la capacidad de ambos es de 20.000 Kg.

Formulación del modelo.

Parámetros:

N= conjunto de nodos (i, j), i=0 corresponde a la planta (véase anexo 1).

T= Horizonte de planificación (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

K= Numero de vehículos (1)

Q = Capacidad del vehículo 20.000 Kg

H = \$0.12

CT i j = Costo de transporte del arco (i, j), i, j ∈ N (Véase Anexo 2)

d i t = demanda del cliente i en el periodo t, datos de cada cliente se presentan en la tabla 1

2.5.1 Modelo Matemático

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^{t=7} HI_t + \sum_{i=1}^{i=18} \sum_{j=1; j \neq i}^{i=18} \sum_{t=1}^7 CT_{ij} X_{ijt} ; (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$I_t = N_{planta} + r_t - \sum_{i=1}^{i=18} q_{it}; \forall t \in T (t = 1) \quad (2)$$

$$I_t = I_{t-1} + r_t - \sum_{k=1}^{k=6} q_{it}; \forall t \in T (t > 1) \quad (3)$$

$$m_{it} = N_{cliente} + q_{it} - d_{it}; \forall i \in N'; t \in T (t = 1) \quad (4)$$

$$m_{it} = m_{it-1} + q_{it} - d_{it} \forall i \in N'; t \in T \quad (5)$$

$$q_{it} \leq C_i Y_{it} \forall i \in N', t \in T \quad (6)$$

$$q_{it} \leq C_i - m_{it-1}; \forall i \in N'; t \in T \quad (7)$$

$$q_{it} \geq C_i Y_{it} - m_{it-1}; \forall i \in N'; t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{i=18} q_{it} \leq Q; \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{i=18} q_{it} \leq Q Y_{0t}; \forall t \in T \quad (11)$$

$$U_{it} - U_{jt} + N_{nodos} X_{ijt} \leq N_{nodos} - 1; \forall i, j \in N (i \neq j, i \geq 2, j \geq 2); t \in T \quad (12)$$

$$U_{it} \leq N_{nodos} - 1 - (N_{nodos} - 2) X_{1it}; \forall i \in N (i \geq 2); t \in T \quad (13)$$

$$U_{it} \leq 1 + (N_{nodos} - 2) X_{it}; \forall i \in N (i \geq 2); t \in T \quad (14)$$

$$Y_{it} \leq 1; \forall i \in N'; t \in T$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^{j=18} X_{ijt} = Y_{it}; \forall i \in N; t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{j=0}^{j=18} X_{ijt} - \sum_{j=0}^{j=18} X_{jit} = 0; \forall i \in N; t \in T \quad (16)$$

$$I_t \geq 0; \forall t \in T \quad (17)$$

$$m_{it} \geq 0; \forall i \in N'; t \in T \quad (18)$$

$$q_{it} \geq 0 ; \forall i \in N'; t \in T \quad (19)$$

$$X_{ijt} \in \{0,1\}; \forall i,j \in N(i \neq j); t \in T \quad (20)$$

$$Y_{it} \in \{0,1\} ; \forall i \in N; t \in T \quad (21)$$

El modelo matemático para el caso de los clientes de consumo de oxígeno de la zona sur es el mismo que el de la zona norte, para este caso simplemente se reemplazan los datos propios de cada cliente como se presentan en la tabla 3.

2.6 Esquema de rutas para Nitrógeno y Dióxido de Carbono

En los casos del producto de nitrógeno y dióxido de carbono el modelo es el mismo también, con la particularidad de que para ambas operaciones se utilizan 2 cisternas de 26 toneladas para el Nitrógeno y 2 cisternas de 18 y 22 toneladas para el Dióxido de carbono.

2.6.1 Modelo Matemático

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^{t-7} HI_t + \sum_{i=1}^{i-16} \sum_{j=1; j \neq i}^{i-16} \sum_{k=1}^{k-2} \sum_{t=1}^{t-7} CT_{ij} X_{ijkt} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$I_t = Nplanta + r_t - \sum_{k=1}^{k=2} \sum_{i=1}^{i=16} q_{ikt}; \forall t \in T(t = 1) \quad (2)$$

$$I_t = I_{t-1} + r_t - \sum_{k=1}^{k=2} \sum_{i=1}^{i=16} q_{ikt}; \forall t \in T(t > 1) \quad (3)$$

$$m_{it} = N_{cliente} + \sum_{k=1}^{k=2} (q_{ikt} - d_{it}) ; \forall i \in N' ; t \in T (t=1) \quad (4)$$

$$m_{it} = m_{it-1} + \sum_{k=1}^{k=2} (q_{ikt} - d_{it}) ; \forall i \in N' ; t \in T (T > 1) \quad (5)$$

$$m_{it} \leq C_i \quad \forall i \in N' , t \in T \quad (6)$$

$$q_{ikt} \leq C_i Y_{ikt} ; \forall i \in N' ; k \in K ; t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{k=2} q_{ikt} \leq C_i - m_{it-1} ; \forall i \in N' ; t \in T \quad (8)$$

$$q_{ikt} \geq C_i Y_{ikt} - m_{it-1} ; \forall i \in N' ; k \in K ; t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{i=16} q_{ikt} \leq Q_k Y_{0kt} ; \forall k \in K ; t \in T \quad (10)$$

$$U_{ikt} - U_{jkt} + N_{nodos} X_{ijkt} < N_{nodos} - 1 ; \forall i, j \in N (i \neq j, i > 2, j > 2), k \in K ; t \in T \quad (11)$$

$$U_{ikt} \leq N_{nodos} - 1 - (N_{nodos} - 2) X_{likt} ; \forall i \in N (i \geq 2) ; k \in K ; t \in T \quad (12)$$

$$U_{ikt} \leq 1 + (N_{nodos} - 2) X_{i\ell kt} ; \forall i \in N (i \geq 2) ; k \in K ; \ell \in T \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^{k=2} Y_{ikt} \leq 1 ; \forall i \in N' ; k \in K ; t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^{j=16} X_{ijkt} = Y_{ikt} ; \forall i \in N ; k \in K ; t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{j=0}^{j=16} X_{ijkt} = \sum_{j=0}^{j=16} X_{jik t} ; \forall i \in N ; k \in K ; t \in T \quad (16)$$

$$I_t \geq 0 ; \forall t \in T \quad (17)$$

$$m_{it} \geq 0 ; \forall i \in N' ; t \in T \quad (18)$$

$$q_{ikt} \geq 0 ; \forall i \in N' ; k \in K ; t \in T \quad (19)$$

$$X_{ijkt} \in \{0, 1\} ; \forall i, j \in N (i \neq j), k \in K ; t \in T \quad (20)$$

$$Y_{ikt} \in \{0, 1\} ; \forall i \in N; k \in K; t \in T \quad (21)$$

Las mismas restricciones se cumplen en el caso del Dióxido de Carbono, solo se reemplazan los valores correspondientes de la operación que se indican en la tabla 1.

2.7 USO DEL SOFTWARE

En el desarrollo de este proyecto se utilizaron los softwares GAMS STUDIO, Microsoft Excel, y Visual Basic los cuales facilitaron el análisis, manejo y representación de datos:

GAMS Studio: Es un sistema de modelado de programación matemática que permite resolver problemas lineales, no lineales y de optimización. GAMS usa un lenguaje de modelización, en donde el usuario puede escribir en un editor la formulación del modelo matemático, y luego aplica un solver para resolver completamente el modelo, brindándole así un claro conocimiento de las condiciones de su modelo y de las consecuencias que tiene sobre él un cambio en el valor de cualquier variable.

- Microsoft Excel: Los datos proporcionados para el proyecto con los tres enfoques analizarse van a ser almacenados en hojas de cálculo Excel. Los autores (Gardey-Pérez, 2021), manifiestan el cálculo de datos contenidos en tablas, modos de vista o autovalores. Dentro de las funciones que tiene este software fueron de utilidad para el manejo de importación y análisis de la data.

2.8 CONSIDERACIONES ETICAS Y LEGALES

Se considera la importancia de la confidencialidad con los involucrados en las respectivas entrevistas realizadas, así como también de las personas que brindaron la información, la cual fue necesaria para llevar a cabo el proyecto.

La empresa maneja altos estándares de seguridad a nivel mundial, con el fin de que todas sus operaciones se desarrollen de manera segura y que todos los colaboradores puedan llegar a sus hogares de manera segura.

Al ser la distribución una de las operaciones más críticas, ningún negocio está por encima de la seguridad, de tal manera que, al ser el producto líquido criogénico que puede causar daños ambientales y fatalidades esta cumple con todos los lineamientos de la Norma Técnica Ecuatoriana “NTE INEM 2266” que regula el transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Sin mencionar las campañas de concientización contra las distracciones en cabinas y fatiga asociada a excesos de horas laborales de conductores profesionales, el problema a resolver toma en cuenta las jornadas laborales y de conducción para el Ruteo Vehicular.

2.9 Fases del proyecto.

Para llevar a cabo la solución del problema en relación con los objetivos específicos establecidos, se plantean las siguientes fases:

2.10 CRONOGRAMA DE TRABAJO

A continuación, se muestra el cronograma de trabajo, se detalla todas las actividades realizadas con el fin de llevar un control sobre cada proceso que presentó el desarrollo del proyecto hasta la fecha y lo pendiente.

Tabla 2.10.1 Cronograma de actividades desarrollado durante el proceso

Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Estado	Mayo				Junio				Julio				Agosto			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. Levantamiento de información																			
1.1. Entrevista con líderes de procesos	9/5/2022	14/5/2022	Completado																
1.2 Descripción de la problemática	9/5/2022	14/5/2022	Completado																
1.3 Recopilación de datos historicos	9/5/2022	14/5/2022	Completado																
1.4 Revisión de procesos de distribución	16/5/2022	3/6/2022	Completado																
2. Diseño y Construcción de Modelo Matemático																			
2.1 Estructuración de la Data Maestra Clientes	6/6/2022	17/6/2022	Completado																
2.2 Estructuración de la Data Maestra Productos	6/6/2022	17/6/2022	Completado																
2.3 Estructuración de la Data Maestra Costos	6/6/2022	17/6/2022	Completado																
2.4 Estructuración de la Data Maestra de Flota	6/6/2022	17/6/2022	Completado																
2.5 Análisis de modelo matemático IRP	25/6/2022	22/7/2022	Completado																
2.6 Modelamiento de IRP en GAMS	18/7/2022	29/7/2022	Completado																
3. Análisis de resultados																			
3.1 Análisis de resultados de modelo	1/8/2022	5/8/2022	Completado																
3.2 Ajuste de modelo	8/8/2022	12/8/2022	Completado																

CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y análisis

Luego de revisar las estrategias matemáticas que giran en torno al caso de investigación, validaremos el modelo propuesto en el caso de estudio adaptando las características del problema.

De acuerdo a los datos obtenidos de la empresa, (demanda, capacidades de almacenamiento, producción y costos) se implementó el modelo con los cuatro casos de distribución de líquido criogénico (Dióxido de carbono, Nitrógeno y Oxígeno zona norte y zona sur) a nivel nacional, haciendo uso del Solver CEPLEX de GAMS, con el fin de evaluar los resultados obtenidos e identificar oportunidades de mejora, así como contrastar la situación de costos actuales con los propuestos por el modelo IRP.

Una vez implementado el modelo del problema en GAMS, se obtuvieron las siguientes soluciones para cada caso respectivamente. La secuenciación de rutas para cada vehículo durante la semana considerada en el horizonte de planificación se puede observar en las tablas que se detallarán a continuación.

Se aclara que la planificación comienza en el día 1, iniciando domingo como primer día de planificación y termina el día 7 como sábado. Para el día 1 no se realiza ruta debido a que primero se debe conocer la misma.

Realizaremos una interpretación de las restricciones y función objetivo de este modelo matemático con un modelo básico del IRP para conocer su funcionamiento.

De antemano conocemos que los valores de la función objetivo están representados por los costos de transporte y de inventario los cuales serán minimizados, considerando clientes, días de entrega y vehículos.

Para las interpretaciones de las restricciones, tenemos las siguientes:

- Nivel de inventario inicial: Se valida el balance de inventario que será igual al nivel de inventario que se mantiene actualmente en la planta, en adición a la producción de dicho material y la resta de lo que se va a enviar, tomando como ejemplo el producto Oxígeno zona sur, se tiene los siguientes resultados del nivel de inventario en planta que arroja el modelo.

Tabla 3.1.1 Nivel de inventario que arroja el modelo.

Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7
40,000.00	26,390.00	39,726.00	58,583.50	83,583.50	105,343.50	130,343.50

- Se considera de igual manera el nivel de inventario por periodo que corresponde a su nivel de inventario actual menos el nivel de inventario que se mantiene en el periodo anterior, más el nivel de inventario de lo que se produce en un determinado día de la semana y que se reduce del nivel de inventario de lo que se envía a los clientes. Estas restricciones corresponden a la nivelación de inventario en planta. Se presenta el mismo comportamiento de balance de inventario, pero para la situación en los clientes. Como se muestra en la tabla **3.1.1** al inicio del periodo T, el nivel inicial en planta es de 40.000 Kg y a medida que el modelo va realizando las iteraciones, el siguiente periodo, el nivel en

planta es de 26.390,00 Kg, que es el resultado de la producción de ese día menos lo que se envió a los clientes en ese periodo más lo que quedo del periodo anterior.

- La nivelación de inventario en los clientes corresponderá, en el inicio del periodo, a la cantidad de inventarios que dispone el cliente más lo que le fue entregado y en relación a su consumo. Esto corresponde para cada uno de los periodos posteriores a la inicial. Se considera de igual manera en una restricción de nivelación la capacidad de almacenamiento de producto en el cliente, es decir, los clientes no pueden recibir más producto de lo que se les permite almacenar. En la tabla 3.1.2 se muestran los resultados obtenidos en el modelo para el mismo caso, de cómo se comporta el inventario en cada cliente y periodo, por ejemplo, para el cliente 1, luego de su consumo, el día 2 del horizonte de planificación se le envía 14.310 Kilogramos menos el consumo de ese día, el cliente termina el periodo en 17.190 Kg.

Tabla 3.1.2 Consumo del cliente i en el periodo t.

CLIENTE	PERÍODO						
	1	2	3	4	5	6	7
1	3.690,0	17.190,0	16.380,0	15.570,0	14.760,0	17.460,0	17.460,0
2	1.638,0	7.038,0	6.876,0	6.714,0	6.552,0	6.552,0	6.552,0
3	972,0	972,0	972,0	972,0	405,0	405,0	405,0
4	3.690,0	17.190,0	16.380,0	17.190,0	16.380,0	18.000,0	18.000,0
5	832,5	3.532,5	3.465,0	3.397,5	3.330,0	3.262,5	3.195,0
6	7.650,0	6.300,0	4.950,0	3.600,0	2.250,0	1.170,0	225,0
7	607,5	540,0	472,5	405,0	337,5	270,0	202,5
8	522,0	522,0	36,0	36,0	3.600,0	3.600,0	3.330,0
9	270,0	270,0	0	0	2.700,0	2.700,0	2.430,0
10	405,0	405,0	405,0	405,0	108,0	108,0	108,0
11	522,0	522,0	3.222,0	3.222,0	2.844,0	2.844,0	2.844,0
12	675,0	675,0	675,0	351,0	351,0	351,0	351,0

13	522,0	522,0	3.195,0	3.195,0	2.844,0	2.844,0	2.844,0
14	900,0	900,0	576,0	576,0	576,0	576,0	576,0
15	450,0	450,0	450,0	180,0	180,0	180,0	180,0

- Se considera también una restricción tipo switch, la cual me indica que lo que se le enviará al cliente, debe ser menor o igual a la capacidad de almacenamiento del cliente, una vez que se haya decidido enviar o no a dicho cliente. Esto es para evitar enviar cualquier volumen y que se alinee a la capacidad de almacenamiento del cliente, en la tabla 3.1.3 se muestra cómo opera esta variable binaria, es decir, si el modelo decide enviar producto al cliente i , el día t en el camión k , esta toma el valor de 1 y a su vez activa las restricciones de capacidades.

Tabla 3.1.3 Modelo en acción determinando si enviar los productos al cliente.

ARCO (i, j)		PERÍODO				
		2	3	4	5	6
0	1	1		1	1	1
0	2	1	1			
1	1	1				1
2	2	1				
4	1			1		1
4	2	1				
5	1	1				
8	1				1	
9	1				1	
11	2		1			
13	2		1			

- Se adicionan restricciones del tipo oferta y otra del tipo demanda, las cuales indican que todo lo que se envía debe ser menor o igual a la capacidad de almacenamiento de cada cliente y todo lo que se pida debe ser mayor o igual a la

demanda pedida por los clientes. En la imagen 3.1.1 se muestra directamente del reporte de soluciones como opera la restricción de capacidades en los clientes 1 y 2 donde el rango de capacidad oscila entre menos infinito y la capacidad de almacenamiento en cliente que es 18.000 Kg para el cliente 1 y 7200 para el cliente 2.

```

---- EQU CAPACIDAD_DE_ALMACENAMIENTO
      LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
1 .1  -INF    3690.000  18000.000      .
1 .2  -INF   17190.000  18000.000      .
1 .3  -INF   16380.000  18000.000      .
1 .4  -INF   17190.000  18000.000      .
1 .5  -INF   16380.000  18000.000      .
1 .6  -INF   17460.000  18000.000      .
1 .7  -INF   17460.000  18000.000      .
2 .1  -INF    1638.000   7200.000      .
2 .2  -INF    7038.000   7200.000      .
2 .3  -INF    6876.000   7200.000      .
2 .4  -INF    6714.000   7200.000      .
2 .5  -INF    6552.000   7200.000      .
2 .6  -INF    6552.000   7200.000      .
2 .7  -INF    6552.000   7200.000      .

```

Figura 3.1.1 Capacidad de almacenamiento

- Se consideran restricciones de capacidades de vehículo y restricciones de sub ciclos. El modelo matemático permite decidir si se visita al cliente o no, y en caso que se decida visitarlo, que se lo realice solo una vez. Las tablas 3.2.2 y 3.1.3, muestran parte de las iteraciones del modelo donde se puede evidenciar que dentro de las visitas a los clientes 1 y 2 no se forman subtours dentro de la red.


```

---- EQU ELIMINACION_SUBTOURS_1

```

		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
1	.2	.1.1	-INF	.	15.000	.
1	.2	.1.2	-INF	-1.000	15.000	.
1	.2	.1.3	-INF	-1.000	15.000	.
1	.2	.1.4	-INF	.	15.000	.
1	.2	.1.5	-INF	.	15.000	.
1	.2	.1.6	-INF	.	15.000	.
1	.2	.1.7	-INF	-1.000	15.000	.
1	.2	.2.1	-INF	.	15.000	.
1	.2	.2.2	-INF	-1.000	15.000	.
1	.2	.2.3	-INF	-1.000	15.000	.
1	.2	.2.4	-INF	-1.000	15.000	.
1	.2	.2.5	-INF	.	15.000	.
1	.2	.2.6	-INF	.	15.000	.
1	.2	.2.7	-INF	-1.000	15.000	.
1	.3	.1.1	-INF	.	15.000	.
1	.3	.1.2	-INF	15.000	15.000	.
1	.3	.1.3	-INF	-1.000	15.000	.
1	.3	.1.4	-INF	.	15.000	.
1	.3	.1.5	-INF	1.000	15.000	.
1	.3	.1.6	-INF	1.000	15.000	.
1	.3	.1.7	-INF	.	15.000	.
1	.3	.2.1	-INF	.	15.000	.
1	.3	.2.2	-INF	.	15.000	.
1	.3	.2.3	-INF	-1.000	15.000	.
1	.3	.2.4	-INF	-1.000	15.000	.
1	.3	.2.5	-INF	1.000	15.000	.
1	.3	.2.6	-INF	1.000	15.000	.
1	.3	.2.7	-INF	.	15.000	.

Figura 3.1.2 Clientes y los subtours

```

---- EQU ELIMINACION_SUBTOURS_2

```

		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
1	.1	.1	-INF	.	15.000	.
1	.1	.2	-INF	14.000	15.000	.
1	.1	.3	-INF	14.000	15.000	.
1	.1	.4	-INF	14.000	15.000	.
1	.1	.5	-INF	15.000	15.000	.
1	.1	.6	-INF	15.000	15.000	.
1	.1	.7	-INF	14.000	15.000	.
1	.2	.1	-INF	.	15.000	.
1	.2	.2	-INF	14.000	15.000	.
1	.2	.3	-INF	14.000	15.000	.
1	.2	.4	-INF	14.000	15.000	.
1	.2	.5	-INF	15.000	15.000	.
1	.2	.6	-INF	15.000	15.000	.
1	.2	.7	-INF	14.000	15.000	.
2	.1	.1	-INF	.	15.000	.
2	.1	.2	-INF	1.000	15.000	.
2	.1	.3	-INF	1.000	15.000	.
2	.1	.4	-INF	.	15.000	.
2	.1	.5	-INF	1.000	15.000	.
2	.1	.6	-INF	1.000	15.000	.
2	.1	.7	-INF	1.000	15.000	.
2	.2	.1	-INF	.	15.000	.
2	.2	.2	-INF	1.000	15.000	.
2	.2	.3	-INF	1.000	15.000	.
2	.2	.4	-INF	1.000	15.000	.
2	.2	.5	-INF	1.000	15.000	.
2	.2	.6	-INF	1.000	15.000	.
2	.2	.7	-INF	1.000	15.000	.

Figura 3.1.3 Clientes y los subtours

- Es importante considerar el balance de flujo en los nodos, por lo que se considera también las restricciones de que en caso de que se visita al cliente,

este debe salir, en la imagen 3.1.3 se muestra los resultados de la variable de balance de flujo, donde solo se activa en caso de que el nodo sea visitado solo una vez.

```

---- 174 VARIABLE x.L 1 si el arco (i j) es visitado por el vehiculo k en
                        el periodo t y 0 en otro caso

INDEX 1 = 0
      2      3      4      6
1 .1    1.000
4 .2    1.000      1.000      1.000
9 .2
11.1
INDEX 1 = 1
      2      3      4      5      6      7
0 .2
1 .1    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
1 .2    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000    1.000
3 .1    1.000
5 .1

```

Figura 3.1.4 Resultados de modelo matemático implementado.

3.2 Análisis computacional.

Dado a que dentro del modelo tenemos muchos sub índices y conjuntos (Camiones, clientes, horizonte de planificación), se realizaron instancias en donde se verifico como se comportaba el modelo a medida que se incrementaba su complejidad, es decir, si los tiempos computacionales son prudentes hasta que brinde una solución óptima y el GAP para cada caso e instancia.

En el caso de CO2 se observó que para la resolución del del modelo, el número de iteraciones se incrementaba considerablemente a medida que aumentaban los nodos

de la red, lo cual tiene sentido ya que esta por las características propias de este caso es mucho más difícil que las demás operaciones.

El GAP con respecto al óptimo es en promedio del 6%, lo cual es aceptable, ya que al ir probando el modelo con más clientes aumentan considerablemente el número de variables y restricciones.

El tiempo de resolución para los casos del Nitrógeno y Oxígeno, son menos de 1 segundo, a su vez, estos no presentaban mucha variabilidad a medida que se incrementaban más clientes, mas no es el caso para el Dióxido de Carbono, ya que este si aumentaban considerablemente el tiempo de resolución (aproximadamente 16 minutos con todos los nodos de la red).

CO2							
Caso	Clientes	Número de Restricciones	Número de Variables	Número de Iteraciones	Tiempo Computacional	Óptimo	GAP
1	5 Clientes	890	1289	425	0:00:01	\$ 11.563,65	6%
2	8 Clientes	1730	2696	2925	0:00:01	\$ 9.466,00	5%
3	10 Clientes	2430	3914	55069	0:00:06	\$ 9.402,76	10%

NITRÓGENO							
Caso	Clientes	Número de Restricciones	Número de Variables	Número de Iteraciones	Tiempo Computacional	Óptimo	GAP
1	5 Clientes	890	1289	232	0:00:01	\$ 10.809,83	10%
2	8 Clientes	1730	2696	1557	0:00:01	\$ 7.679,80	2%
3	10 Clientes	2430	3914	2744	0:00:01	\$ 10.574,53	8%

OXÍGENO ZONA NORTE							
Caso	Clientes	Número de Restricciones	Número de Variables	Número de Iteraciones	Tiempo Computacional	Óptimo	GAP
1	5 Clientes	890	1289	383	0:00:01	\$ 11.189,20	2%
2	8 Clientes	1730	2696	711	0:00:01	\$ 12.617,30	3%
3	10 Clientes	2430	3914	1249	0:00:01	\$ 12.598,57	3%

OXÍGENO ZONA SUR							
Caso	Clientes	Número de Restricciones	Número de Variables	Número de Iteraciones	Tiempo Computacional	Óptimo	GAP
1	5 Clientes	890	1289	268	0:00:01	\$ 9.428,90	1%
2	8 Clientes	1730	2696	546	0:00:01	\$ 12.200,00	7%
3	10 Clientes	2430	3914	1747	0:00:01	\$ 12.076,52	10%

Figura 3.2.1 Valor óptimo de los clientes por zona

Se detallan gráficos para cada instancia de cada material evaluado en este estudio en el que podemos identificar cómo se comporta el modelo, según sea el caso.

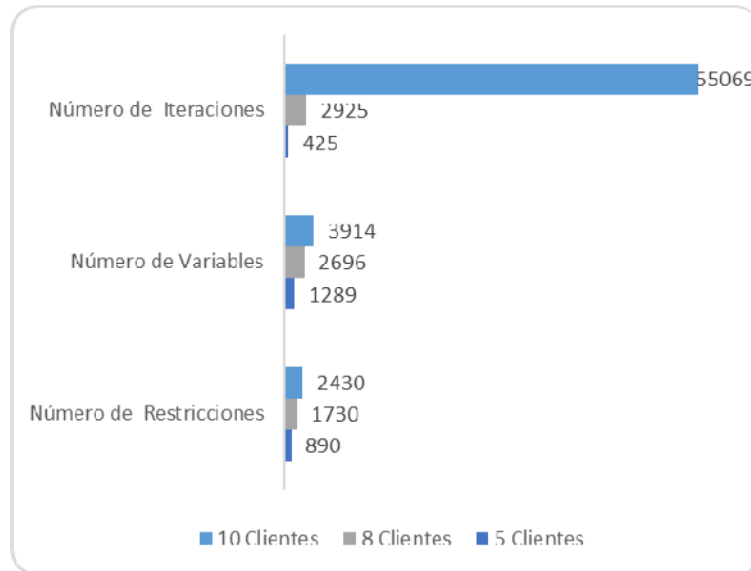


Figura 3.2.2 Instancia de CO2

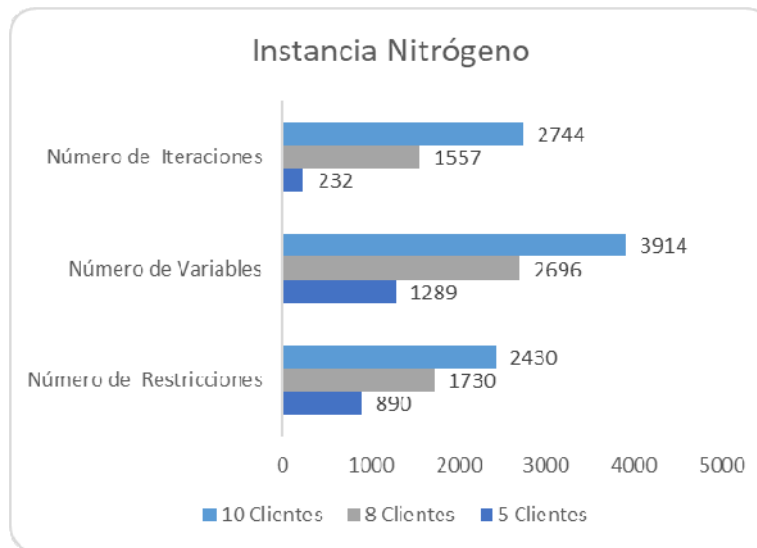


Figura 3.2.3 Instancia Nitrógeno.

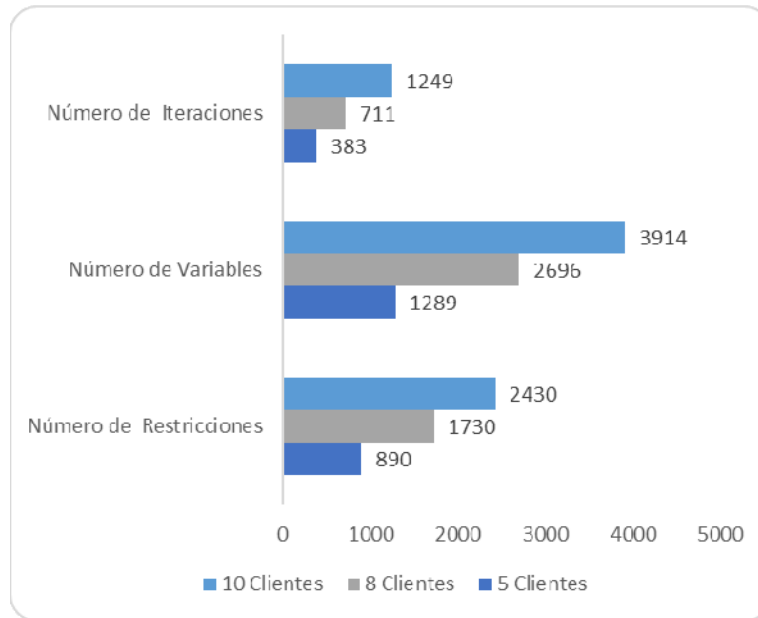


Figura 3.2.4 Instancia oxígeno zona norte

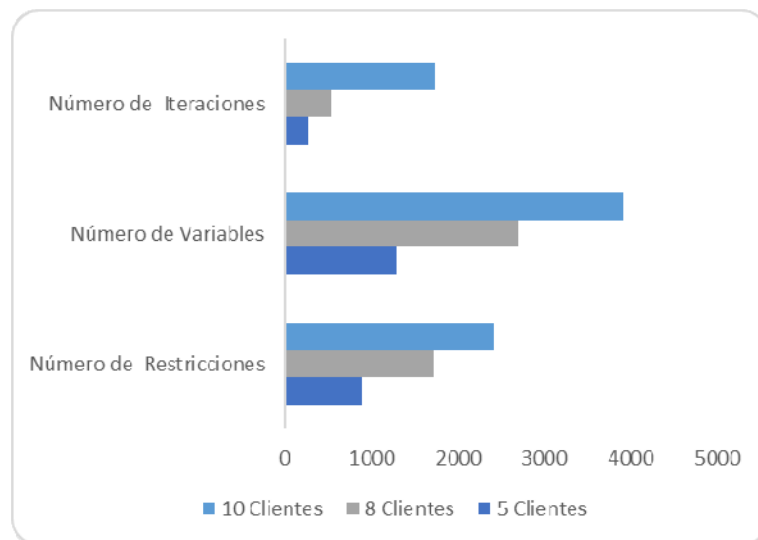


Figura 3.2.5 Instancia oxígeno zona sur

En esta etapa se establece en qué período deben ser visitados los clientes y cuál es la cantidad de producto a enviar a cada uno, para esto se debe cumplir con la demanda y las restricciones de capacidad de inventario de cada cliente.

Para determinar el plan de entrega se utilizó un procedimiento parecido al propuesto por Saltos y Aceves (2012), pero a diferencia del algoritmo de los autores, la cantidad a enviar al cliente (q) será la capacidad máxima menos el inventario guardado al final del período anterior. Se detallarán los diferentes resultados identificados para cada producto

3.3 Propuesta de distribución de productos.

3.3.1 Propuesta de distribución Dióxido de Carbono.

Revisando la demanda de los clientes se evidencia que la planificación de la semana apunta a entregar casi en su totalidad la misma. Se realiza el comparativo de la situación actual con la solución obtenida para el Dióxido de Carbono

Tabla 3.3.1 Demanda de los clientes del Producto C02

CLIENTE	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
1	20.000,0	0,0	20.000,0	0,0	20.000,0	0,0	0,0
2	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	0,0	0,0
3	2.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	0,0	0,0
4	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	0,0	0,0
5	2.000,0	2.000,0	2.000,0	2.000,0	2.000,0	1.500,0	0,0
6	1.800,0	1.800,0	1.800,0	1.800,0	1.800,0	1.000,0	0,0
7	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	0,0
8	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0	0,0
9	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	0,0
10	2.500,0	2.500,0	2.500,0	2.500,0	2.500,0	2.500,0	2.500,0
11	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0
12	0,0	17.000,0	0,0	17.000,0	0,0	17.000,0	0,0
13	3.200,0	3.200,0	3.200,0	3.200,0	3.200,0	2.000,0	1.000,0
14	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	0,0	0,0
15	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	0,0	0,0
16	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	0,0

Tabla 3.3.2 Capacidad de clientes de CO2

CLIENTE	CAPACIDAD	CLIENTE	CAPACIDAD
1	54.000,0	9	3.600,0
2	1.800,0	10	13.500,0
3	7.200,0	11	4.500,0
4	3.600,0	12	36.000,0
5	18.000,0	13	22.500,0
6	13.500,0	14	5.400,0
7	4.500,0	15	5.400,0
8	4.050,0	16	19.800,0

Tabla 3.3.3 Resultados Obtenidos - Demanda de Clientes del Producto CO2

CLIENTE	VEHÍCULO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO
1	1				7.000,0		
1	2		7.500,0			7.000,0	
2	2						11.700,0
3	2				7.150,0		
6	1					13.275,0	
7	2			4.425,0			
8	2		3.597,5				
9	1					3.575,0	
10	2			12.750,0			
11	1	3.725,0					
12	1				11.900,0		
12	2	17.000,0					5.950,0
13	1		19.115,0				
14	1			5.100,0			
15	1			5.100,0			
16	1	16.600,0	1.750,0				
16	2				3.500,0		

En la secuenciación de rutas se puede observar que en la semana 1, alguno de los clientes no es visitados por lo que cabe resaltar que al conocer la demanda con anticipación el proveedor suprime el costo de distribución a dicho cliente, eliminando un

costo innecesario. Para los siguientes productos, se propone de igual manera la planificación de la demanda. Observamos las tablas con los resultados. Se confirma que para cada cliente no se incurre en desabastecimiento para el horizonte de planificación.

3.3.2 Propuesta de distribución Nitrógeno.

Tabla 3.3.4 Situación Actual – Demanda de Clientes del Producto Nitrógeno

CLIENTE	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7
1	3.200,0	3.200,0	3.200,0	3.200,0	3.200,0	0,0	0,0
2	0,0	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	350,0	0,0	0,0
4	10.000,0	0,0	0,0	10.000,0	0,0	0,0	10.000,0
5	0,0	1.400,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	22.000,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1.400,0	0,0	0,0	1.400,0	0,0	1.400,0	0,0
8	0,0	2.500,0	0,0	2.000,0	0,0	1.000,0	0,0
9	800,0	0,0	0,0	600,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	1.000,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	4.000,0	0,0	2.500,0	0,0	2.500,0	0,0	0,0
12	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0	1.000,0	0,0	0,0
13	0,0	6.000,0	0,0	6.000,0	0,0	0,0	0,0
14	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0
15	0,0	0,0	0,0	1.800,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	1.750,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 3.3.5 Capacidad de almacenamiento clientes de Nitrógeno

CLIENTE	CAPACIDAD	CLIENTE	CAPACIDAD
1	5.400,0	9	1.800,0
2	2.700,0	10	1.800,0
3	1.800,0	11	9.000,0
4	27.000,0	12	4.500,0
5	1.800,0	13	18.000,0
6	22.500,0	14	81.000,0
7	3.600,0	15	2.700,0
8	5.400,0	16	1.800,0

Tabla 3.3.6 Propuesta de distribución Nitrógeno

CLIENTE	VEHICULO	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES
1	2			5.394,0	
2	1				12.305,0
3	2			1.350,0	
4	2	16.505,0			
6	1	16.875,0			
7	2	2.896,0			
8	1		4.400,0		
11	1		7.310,0		
12	1			3.655,0	
13	2		14.340,0		
15	1	2.025,0			5.252,0

3.3.3 Propuesta de distribución Oxígeno Zona Norte.

Tabla 3.3.7 Propuesta de distribución Oxígeno Zona norte

CLIENTE	VEHÍCULO	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES
1	1		4.518,0		
2	1	14.280,0			
2	2			1.560,0	
3	1	1.350,0			
4	1			1.402,0	
5	1				3.380,0
5	2	13.500,0			
6	2			1.454,0	
9	1				14.800,0
10	2		2.493,0		
12	1		2.233,0		
16	2		1.350,0		
18	2	2.025,0			

3.3.4 Propuesta de distribución Oxígeno Zona Sur.

Tabla 3.3.8 Propuesta de distribución Oxígeno Zona sur

CLIENTE	VEHICULO	LUNES	MARTES	MIERCOLES	VIERNES
1	1	14.310,0		1.620,0	
1	2				16.200,0
2	2	5.562,0			
3	1	4.428,0			
4	2	14.310,0		1.620,0	1.620,0
5	1			2.903,0	
8	2		3.078,0		
9	2		2.430,0		
11	1		3.078,0		
13	1		3.078,0		

La utilización de los vehículos para cada caso está en promedio en 85%, que corresponde a la cantidad promedio enviada en cada periodo sobre la capacidad de cada cisterna en cada problema.

Tabla 3.3.9 Utilización de la flota.

PRODUCTO	VEHICULO	UTILIZACION
DIOXIDO DE CARBONO	Camión 1	92%
	Camión 2	94%
OXIGENO ZONA NORTE	Camión 1	78%
	Camión 2	78%
OXIGENO ZONA SUR	Camión 1	94%
	Camión 2	99%
NITROGENO	Camión 1	73%
	Camión 2	75%
PROMEDIO		85%

Para la planificación de la semana del componente Oxígeno en ambas zonas y Nitrógeno, se presenta la propuesta de planificación. Los resultados de las funciones objetivo de cada instancia muestran el valor de los costos de transporte y almacenamiento se detallan en la tabla.

Tabla 3.3.10 Productos y los costos de la propuesta.

PRODUCTO	COSTO PROPUESTA
DIÓXIDO DE CARBONO	\$ 10.047,92
OXÍGENO ZONA NORTE	\$ 12.822,84
NITRÓGENO	\$ 6.992,07
OXÍGENO ZONA SUR	\$ 11.573,12
TOTAL	\$ 41.435,95

3.4 Propuesta de distribución de productos.

En el esquema actual de distribución de la empresa, las rutas son ejecutadas de manera empírica, la asignación de los clientes a los vehículos se realiza mediante la observación diaria de los niveles de los clientes, ocurriendo el caso de que algunos clientes son visitados sin ser necesario dado a que su nivel en ese momento puede mantener sus niveles de producción hasta el siguiente horizonte de planificación.

Una de las ventajas del modelo propuesto es que, precisamente se puede realizar las planificaciones una vez a la semana para todo el horizonte de planificación, actualizando los datos del modelo con los datos actuales del cliente en esa instancia de tiempo.

Se expone en la tabla 3.4.1 el contraste de costos de los últimos 7 meses del año en curso, mismos que fueron proporcionados por la empresa, con el sistema de distribución actual, en promedio se tendrá un ahorro estimado del 13.24%.

Tabla 3.4.1 Costos de producción y transporte de enero a julio del presente año.

MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
VARIABLE (KM + COMBUSTIBLE)	\$144.804,7	\$145.591,7	\$134.579,0	\$137.952,2	\$140.330,5	\$142.538,1	\$135.584,8
PRODUCCIÓN	\$ 40.137,0	\$ 48.097,0	\$ 45.131,0	\$ 43.267,0	\$ 46.909,0	\$ 44.267,0	\$ 44.439,0
COSTO TOTAL	\$184.941,7	\$193.688,7	\$179.710,0	\$181.219,2	\$187.239,5	\$186.805,1	\$180.023,8

Tabla 3.4.2 Sistema de distribución y sus costos.

SISTEMA DE DISTRIBUCION	COSTOS
PROMEDIO MENSUAL	\$184.804,00
PROMEDIO SEMANAL	\$ 46.201,00
PROPUESTA	\$ 40.084,36
DIFERENCIA	\$ 6.116,64
DIFERENCIA %	13,24%
AHORRO ANUAL PROMEDIO	\$ 73.399,66

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones Y Recomendaciones

4.2 Conclusiones.

Al analizar la demanda, se pudo evidenciar que mantiene un patrón constante en cada cliente acorde a su nivel de producción, no se evidencio estacionalidades en los últimos meses, por lo que se pudo adaptar al modelo como una demanda determinística y poder modelar la situación actual para contrastar con la propuesta.

Se encontró un modelo que se ajusta a la situación de la empresa, y genera soluciones optimas, sistematiza el proceso de planificación al realizarlo semanalmente, lo que brinda más tiempo para encontrar oportunidades de mejora al supervisor de transporte para enfocarse en actividades más críticas.

El esquema de costos actuales de la empresa hasta el mes de julio refleja una operación muy costosa para el nivel de complejidad que maneja, una de las ventajas de la propuesta es que disminuye al 13.24% en promedio los costos semanales de la distribución y almacenamiento de producto, este análisis será entregado a la empresa para que valide la propuesta y se implemente en su sistema de distribución.

4.3 Recomendaciones.

Como recomendaciones identificadas exponemos las siguientes:

- 1) Los niveles de inventario actuales en las plantas se consideran altos e innecesarios ya que representan un costo considerable. Se sugiere reducir los niveles de inventario a un margen suficiente que se ajuste a la planificación y pueda surtir adicionalmente, a los procesos de exportación.

2) Para el cada tipo de producto que la planta procesa, se tiene disponible 2 cisternas de capacidad entre 18 y 26 Toneladas. Se sugiere realizar un análisis exhaustivo de la disponibilidad de las cisternas para que se realicen nuevas adquisiciones de las mismas. Esto se transformaría en un incremento del nivel del servicio en la demanda del cliente, ya que, bajo las consideraciones y limitantes actuales, este no se cumple en su totalidad.

BIBLIOGRAFÍA

Adulyasak, Y. C. (2012). *Formulations and branch-and-cut algorithms for multi-vehicle production and inventory routing problems. Technical Report. G-2012 (14)*,. Montreal, Canada: GERAD.

Archetti, C. B. (2009). *Solution methods for the inventory routing problem*. Brescia: University of Brescia.

estadísticas, I. N. (1 de 04 de 2022). *INE CL*. Obtenido de https://www.ine.cl/docs/default-source/indice-de-costos-del-transporte/boletines/2022/bolet%C3%ADn-%C3%ADndice-de-costos-del-transporte-ict-abril-de-2022.pdf?sfvrsn=2ea49ba8_5

Fernando Sandoya Sanchez. (2014). Modelos Avanzados en transporte. *Modelos Avanzados en Transporte*, 64-66.

Fernando Sandoya Sanchez. (2015). *Metaheurísticas y Redes Neuronales*. Guayaquil.

Kleywegt, A. J., Vijay S. Nori, & Martin W. P. Savelsbergh. (2000). *The Stochastic Inventory Routing Problem*. Atlanta: GA 30332-0205.

Universo, D. e. (12 de 1 de 2021). *El Universo*. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/noticias/2021/01/11/nota/9490417/suben-tarifas-fletes-transporte-compensaciones-diesel-incremento/>