

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS

PROYECTO DE GRADO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGISTER EN CONTROL DE OPERACIONES Y GESTIÓN LOGÍSTICA”

TEMA

**DISEÑO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN COMO HERRAMIENTA DE
SOPORTE A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA LOGÍSTICA DE
RETORNO DE LOS CONTENEDORES VACÍOS**

AUTOR

LEIDA LILIANA LÓPEZ SAÁ

Guayaquil- Ecuador

AÑO

2016

DEDICATORIA

A mis padres por su sacrificio, apoyo y empuje incondicional, durante toda mi vida.

A mi familia por sus buenos deseos y acompañamiento a lo largo de mi carrera.

A mi esposo por ser ese amigo y compañero de estudio en la trayectoria de este proyecto.

Leida López Saá

AGRADECIMIENTO

A la Santísima Trinidad por ser siempre mi faro en todos los caminos y decisiones tomadas y por todas las bendiciones otorgadas.

A mi familia, por su perseverancia y apoyo.

A los amigos y personas que colaboraron en el desarrollo de este proyecto, en especial a mi tutor, el Ph.D. Fernando Sandoya, y mi practicante, Sr. Jorge Monserrate, por su paciencia, soporte y apoyo.

Leida López Saá

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; el patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Matemáticas** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

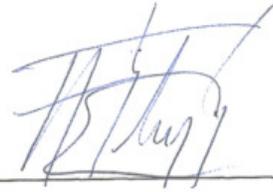
A handwritten signature in blue ink, reading "Leida López Saá", is centered on a white rectangular background.

Ing. Leida López Saá

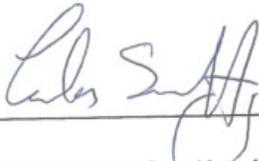
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



M.Sc. Carlos Martín Barreiro
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Fernando Sandoya Sánchez Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO



M.Sc. Carlos Suárez Hernández
VOCAL DEL TRIBUNAL

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.4. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.5. METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO II	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. OPTIMIZACIÓN.....	7
2.2. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.....	8
2.3. PROGRAMACIÓN LINEAL (LP).....	9
2.4. RELAJACIONES Y HEURÍSTICAS.....	15
2.5. PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA (MIP).....	18
2.6. PLANTEAMIENTO DE UN MODELO MATEMÁTICO.....	26
CAPÍTULO III	33
3. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	33
3.1 INTRODUCCIÓN.....	33
3.2. SITUACIÓN ACTUAL.....	34
3.3. PROCESO DE RETORNO PARA EL CONTENEDOR.....	36
VACÍO.....	36
3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	40
3.5. DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	42
3.6. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	52
3.7. INFORME DE LOS RESULTADOS.....	52
CAPÍTULO IV	66
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
4.1 CONCLUSIONES.....	66
4.2. RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXO 1	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de esquema: metodología utilizada en análisis de la demanda.....	5
Figura 1.2: Diagrama de esquema: metodología utilizada para el modelo de optimización.....	6
Figura 2.1: Método Simplex de un modelo LP	15
Figura 2.2 Formulación de un problema de programación lineal entera mixta.	19
Figura 2.3: El nodo raíz y su primera cota inferior z^-	23
Figura 2.4: Ramificando al primer nivel en x_3	23
Figura 2.5: Resolución de las relajaciones lineales y actualización de cotas...	24
Figura 2.6: Resolución de relajaciones, actualización de cotas, y poda de $P_{(.,0,1.,.)}$	24
Figura 2.7: Ramificando el sub problema $P_{(.,1,1.,.)}$ en la variable x_1	25
Figura 2.8: Árbol final con actualización de cotas y poda de $P_{(0,1,1.,.)}$, $P_{(1,1,1.,.)}$, y $P_{(.,.,0.)}$	26
Figura 3.1: Proceso actual.	36
Figura 3.2: Retorno con subcontratación sin arrastre.	38
Figura 3.3: Retorno con subcontratación con arrastre.	40
Figura 3.4: Histórico de la demanda de la compañía en estudio.....	41
Figura 3.5: Comparación con la situación actual.....	63
Figura 3.6: Comparación atención de la demanda.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Costos proveedor sub contratado para el retorno de los vacíos.	3
Tabla 2.1 Comparación entre diferentes optimizadores en un problema LP....	30
Tabla 3.1: Costos proveedor sub contratado para el retorno de los vacíos sin arrastre.....	37
Tabla 3.2: Costos proveedor sub contratado con arrastre para el retorno vacío	39
Tabla 3.3: Histórico de la demanda.....	41
Tabla 3.4: Límite de viajes diarios.....	42
Tabla 3.5: Índices del modelo.	43
Tabla 3.6: Información de entrada: cabezales.	44
Tabla 3.7: Información de entrada: arrastres.	44
Tabla 3.8: Información de entrada: turnos.	44
Tabla 3.9: Tablas y parámetros del modelo.	46
Tabla 3.10: Variables de decisión.	47
Tabla 3.11: Informe de los resultados obtenidos.....	58
Tabla 3.12: Escenarios para la toma de decisiones.....	60
Tabla 3.13: Situación actual con los mejores escenarios posibles.....	62

OBJETIVOS GENERALES

Analizar el comportamiento de los procesos operativos definidos de la empresa de transporte para el retorno de los contenedores vacíos. Establecer los distintos escenarios que brinden una alternativa para la empresa al momento de elegir como operar el proceso de retornos. Diseñar un modelo matemático que permita optimizar el proceso; es decir, que determine la alternativa menos costosa y más eficiente para una empresa de transporte, utilizando la metodología de la investigación de operaciones y los solvers basados en el estado del arte como GAMS/Cplex.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Analizar la situación actual de la empresa, para identificar las actividades o tareas que son ejecutadas durante el proceso de retorno.
- ❖ Establecer una línea base de la demanda y los niveles de reprogramaciones por el retorno de los contenedores vacíos.
- ❖ Comparar los costos actuales con los costos que se puedan generar en la propuesta a presentar generada por el modelo matemático de optimización. Determinando el costo beneficio de la solución planteada.
- ❖ Elaborar un modelo matemático de optimización para la gestión de los contenedores vacíos.
- ❖ Presentar los diferentes escenarios con el fin de determinar cuál decisión tiene mayor soporte para beneficio de la empresa.
- ❖ Recomendar cual es el escenario más conveniente para la empresa.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

La empresa objeto de estudio es una empresa constituida hace 23 años en el mercado ecuatoriano con un capital humano de 200 trabajadores, se encuentra ubicada en la ciudad de Guayaquil, con sucursales al norte y sur de la ciudad y en las principales zonas fronterizas tales como Quito, Tulcán y Huaquillas, su actividad económica principal está dedicada al servicio de transporte seguro de las mercaderías a nivel Nacional. En la actualidad cuenta con recurso fijo propio compuesto de 52 cabezales y 66 equipos de arrastres, equipados con tecnología de punta como, celulares, asistencia de monitoreo GPS, taller mecánico automatizado dentro de su propio Patio de Operaciones para el mantenimiento y maniobras operativas de su flota. Durante el 2013 en el sector de empresas de transporte de carga la compañía se ubicó en el ranking empresarial en el puesto 725 basado en su utilidad y en los ingresos en el puesto 2027 con un margen rentable del 11.37%, para el 2014 reflejo un crecimiento sobre la utilidad colocándola en el puesto 507 mientras que en los ingresos se posicionó en el puesto 2094 con un margen rentable del 16%.

Debido al tipo de servicio que brinda, cuyo objetivo recae en el transporte terrestre de carga pesada con distribución local, y a su participación en la cadena logística como parte del proceso integral dentro del servicio de transportes, el retorno de los vacíos se considera que es un objeto de investigación con características de importancia y actualidad, y que no ha sido profundizado, tanto en temas de estudio de procesos logísticos de transporte, métodos de trabajo, como en aquellos de calidad y mejora continua en la eficiencia de la empresa.

Por otro lado, al ser una empresa con una administración de tipo familiar, hace aún más interesante el estudio, ya que esta empresa no cuenta con estándares establecidos, ni estudios preliminares de procesos de trabajo, por lo que analizar este problema y proponer soluciones eficientes y viables por medio de este trabajo de tesis, representa un beneficio para la empresa, para los actores de este proceso y finalmente para la industria ecuatoriana como objeto de estudio.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Toda carga o mercadería de importación, llega como unidad de carga contenerizada a los distintos puertos del país, esta unidad de carga conocida genéricamente como contenedor, una vez que es transportada y entregada la mercadería en las bodegas de los clientes, el contenedor vacío queda sin carga y por tanto liberado, luego de lo cual debe retornar a los depósitos de almacenaje de contenedores vacíos pertenecientes a las navieras respectivas con sedes en nuestro país, como parte del proceso final en la transportación de carga contenerizada.

La empresa objeto de estudio, es una compañía de transporte que cuenta con su sistema de gestión de calidad ISO 9001 certificado desde el año 2009 por lo cual cuenta con procesos y procedimientos para las diferentes aéreas que participan en la gestión del transporte, sin embargo, en los últimos años 2012 - 2015 , la compañía ha incrementado su necesidad de la contratación de proveedores externos que se dediquen a la devolución de contenedores vacíos, dando como resultado un rubro de gastos constantemente crecido de este proceso, por otro lado, también se ha llegado en algunos casos a generar costos adicionales como pagos de demora (pagos por retención de contenedores), constantes reprogramaciones, insatisfacción de los clientes y pérdida de recursos financieros que en la mayoría de los casos son asumidos por la propia empresa.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Es de vital importancia para la compañía hacer eficiente este proceso, ya que la optimización del mismo garantizará minimizar sus costos operacionales, haciéndola más competitiva la organización en el mercado sin afectar la rentabilidad del giro del negocio.

Actualmente, la planificación del movimiento de los contenedores vacíos en la empresa objeto de este estudio, se lo hace en forma empírica, lo que genera en algunas ocasiones reprogramaciones en las demandas diarias, es decir que si un día tiene una media de 80 despachos desde el puerto en ese día se puede originar alrededor de 10 reprogramaciones y/o por otro lado a falta de recursos como equipos de arrastres para atender los pedidos diarios surge la subcontratación de proveedores terceros, cuyos costos asociados son mostrados en la tabla 1.1

PROVEEDOR	RUTA SUR	RUTA NORTE
Costo del operador sub contratado para entregar el vacío sin arrastre por unidad	\$ 30	\$ 35
Costo del operador sub contratado para entregar el vacío con arrastre por unidad	\$ 35	\$ 40

Tabla 1.1: Costos proveedor sub contratado para el retorno de los vacíos.
Fuente: Elaboración propia.

Estos valores generan un incremento significativo en los costos operacionales de acuerdo a la cantidad de unidades vacías entregadas bajo esta modalidad.

Con la finalidad de disminuir los costos operacionales del proceso de retorno de los contenedores vacíos y volver más eficiente este proceso, se procederá a evaluar y proponer diferentes escenarios que muestren las alternativas más óptimas para el proceso, a través del planteamiento de un

modelo de optimización matemática que permitirá brindar un mejor servicio, logrando la solución adecuada, según la necesidad que la empresa plantea, en su continua evolución. Logrando a su vez una reducción en sus gastos y fortaleciendo la toma de decisiones para un resultado eficiente.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el sistema actual de la logística de retorno de los contenedores vacíos utilizado dentro de las operaciones de la compañía de transporte. Determinar si este sistema es el conveniente para lograr el objetivo de cumplimiento en la demanda de los despachos, la satisfacción de los clientes, el aumento en las ventas, con los recursos actuales que posee la compañía, mediante el diseño de un modelo de optimización matemático para los distintos escenarios posibles que se pueden originar entorno a la operación, los cuales permitirán presentar a la compañía las distintas alternativas para la toma de decisiones que beneficie a la organización en costo y rentabilidad.

1.5. METODOLOGÍA

La metodología a utilizar consistirá en la recolección de datos referentes a la demanda histórica de los retornos de vacíos, y en el diseño e implementación de un modelo de optimización, lo cual permitirá mejorar el proceso logístico de retorno de los contenedores vacíos.

Se diseñará un modelo matemático de optimización, el cual permitirá alertar el momento que la demanda se incremente cual es el escenario que más se ajuste al objetivo rentable de la empresa. Se implementará dicho modelo en el software GAMS (General Algebraic Modeling System), que incorpora el estado del arte de los solvers basados en programación matemática; también permitirá encontrar el punto de equilibrio de cuándo y cuántos

operadores son necesarios para cubrir el proceso de retorno de los vacíos en caso de ser este escenario considerado.

Se evaluará la productividad de la flota teniendo en cuenta las restricciones de capacidad para poder cubrir toda la demanda planificada, lo cual permitirá analizar los resultados.

A continuación, en la figura 1.1 se muestra el esquema para el análisis de la demanda y en la figura 1.2 para la elaboración del modelo de optimización:

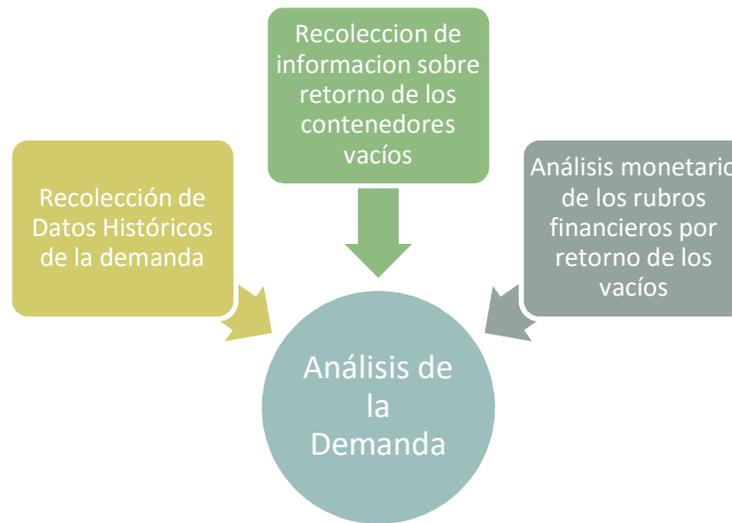


Figura 1.1: Diagrama de esquema: metodología utilizada en análisis de la demanda.

Fuente: Elaboración propia.

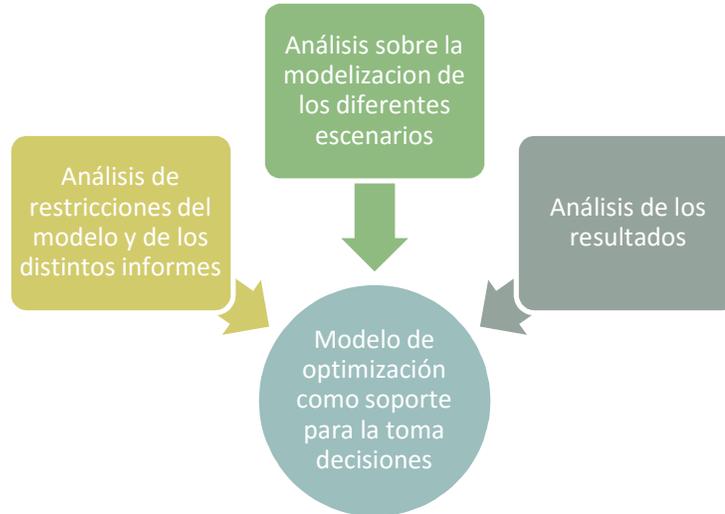


Figura 1.2: Diagrama de esquema: metodología utilizada para el modelo de optimización.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. OPTIMIZACIÓN

La optimización es una parte relevante de la investigación operativa. La misma tuvo su origen en la segunda guerra mundial debido a la necesidad de asignar recursos a las operaciones militares a través de técnicas que se fueron desarrollando y que en la actualidad son usadas en el sector empresarial. Una de las técnicas habituales utilizadas en la investigación operativa es la optimización con sus múltiples formas tales como lineales, no lineales, enteras, estocásticas, multiobjetivo, teoría de la decisión y juegos, teorías de colas y simulación, teoría de grafos o flujos, entre otras técnicas como algoritmos metaheurísticos.

En un problema de optimización se busca encontrar una respuesta a un tipo de problema general, de forma que esta solución sea mejor que el resto de alternativas disponibles de acuerdo a un criterio de comparación entre ellas.

Los problemas de programación matemática corresponden a modelos de optimización que están estructurados de la siguiente manera:

$$\text{Max (min) } f(x)$$

$$x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n$$

En esta descripción, cabe identificar los siguientes elementos que conforman un modelo de programación matemática:

Variables $x = (x_1, \dots, x_n)$

Es un vector que representa las variables de decisión, las cuales identifican las posibles decisiones que pueden tomarse, generalmente estas variables son de carácter cuantitativo.

Función objetivo $f(x)$

La función objetivo es la encargada de medir la calidad de las decisiones, es decir permite calcular el coste/beneficio asociado a cada decisión factible.

Restricciones Ω

Son las condiciones que las variables están obligadas a cumplir o satisfacer en el sistema real, para la obtención de un resultado óptimo.

Un problema de optimización trata entonces de tomar una decisión óptima para maximizar (ganancias, velocidad, eficiencia, etc.) o minimizar (costos, tiempo, riesgo, error, etc.) según el criterio determinado. Las restricciones significan que no cualquier decisión es posible.

2.2. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

Los métodos de optimización son un conjunto de sistematizaciones ordenadas y definidas, representados en modelos matemáticos, estadísticos y algoritmos, que permitirán alcanzar el propósito esperado el cual consistirá en la maximización de los beneficios o minimización de los costos, según el objetivo de la compañía.

Los métodos de optimización los podemos clasificar en:

Métodos Clásicos.- son los algoritmos que buscan garantizar un valor óptimo local y permiten un elevado número de restricciones. Dentro de los cuales se encuentran los siguientes:

- Optimización lineal (LP)
- Optimización lineal entera mixta (MIP)
- Optimización no lineal, estocástica, dinámica, otros.

Métodos Metaheurísticos.- aparecieron ligados a lo que se denominó inteligencia artificial e imitan fenómenos sencillos observados en la

naturaleza. Los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global aunque no garantizan su alcance.

Dentro de los cuales se encuentran los siguientes:

- Los algoritmos evolutivos (genéticos entre otros).
- El método del recocido simulado (*simulated annealing*).
- Las búsquedas heurísticas: (método tabú, búsqueda aleatoria, avariciosa, etc.).
- Los sistemas multiagente.

[1]

2.3. PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)

El modelo de programación lineal [2] optimiza una función lineal con variables y restricciones que mantienen el mismo comportamiento lineal, de tal manera que el modelo permite determinar una técnica de decisión óptima elegida dentro de un gran número de decisiones posibles. Si bien su definición parece un tanto restrictiva, en realidad muchos de los problemas estudiados en el mundo real entran dentro de esta categoría, por ejemplo: [3]

- Asignación de rutas de transporte
- Balance de líneas de producción
- Asignación de procesos a equipos de procesamiento
- Definición de mix de productos
- Definición de mezcla de componentes para productos
- Nivelación de recursos

Cabe recalcar que cualquier problema de programación lineal requiere identificar cuatro componentes básicos:

1. El conjunto de datos.
2. El conjunto de variables involucradas en el problema, junto con sus dominios respectivos de definición.
3. El conjunto de restricciones lineales del problema que definen el conjunto de soluciones factibles.
4. La función lineal que debe ser optimizada (minimizada o maximizada).

Un problema de programación lineal se caracteriza porque su conjunto de soluciones factibles forma un politopo (es decir, la generalización de un polígono para n dimensiones). Por su propia naturaleza, al estar los gradientes definidos en una sola dirección, los puntos extremos se encuentran en la frontera del politopo, más específicamente en algunos de sus vértices. Esto permitió el desarrollo del muy eficiente Método Simplex para su resolución, que se aprovecha de esta particularidad para buscar soluciones solo en dichos puntos. [3]

2.3.1. MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA UN LP

El método más conocido para resolver problemas de programación lineal, es el método simplex, debido a Dantzig, quien lo introdujo en 1947. Afortunadamente, el crecimiento de la capacidad de cálculo de los computadores ha permitido el uso de las técnicas desarrolladas en problemas de gran dimensión. Durante las últimas décadas se ha dedicado mucho trabajo e investigación a los problemas de programación lineal (PPL). Mientras que la implementación del método simplex ha sufrido modificaciones importantes, los conceptos fundamentales no han variado.

Para muchos problemas de programación lineal, el método simplex sigue siendo el mejor. Sin embargo, se han introducido mejoras diversas, como el

método simplex revisado, el dual, o los métodos primal-dual. Este último trabaja simultáneamente con el primal y el dual. Esto puede presentar ventajas pues se puede explotar la bien conocida relación entre las formulaciones (primal y dual) de un determinado problema. [4]

- Simplex (hasta 50000 ecuaciones)
- Punto interior (50000-100000 ecuaciones)

El método del punto interior (MPI) fue introducido por Karmarkar y es una alternativa al método simplex (MS). El método primal-dual ha sido superado por el método predictor-corrector, que es a su vez una versión modificada del primal-dual original de Mehrotra. Este método requiere normalmente menos iteraciones y es el método de punto interior preferido en muchas ocasiones.

Al contrario del método simplex, que tiene complejidad computacional exponencial, el método del punto interior tiene complejidad polinómica. En consecuencia, para problemas grandes (más de 2000 restricciones y variables) los métodos del punto interior superan al método simplex. No obstante, el método simplex encuentra una solución en un número finito de pasos, mientras que el método del punto interior no siempre lo consigue, pues converge asintóticamente a la solución óptima. Si su robustez está en entredicho, la distinción indicada puede ser determinante.

Un problema de programación lineal LP puede clasificarse según sus soluciones en:

Solución factible: Un punto $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ que satisface todas las restricciones se denomina solución factible. El conjunto de todas esas soluciones es la región de factibilidad.

Solución óptima: Un punto factible \hat{x} tal que $f(x) \geq f(\hat{x})$ para cualquier otro punto factible x se denomina una solución óptima del problema.

El objetivo de los problemas de optimización es encontrar un óptimo global. Sin embargo, las condiciones de optimalidad solo garantizan, en general, óptimos locales. Sin embargo, los problemas lineales presentan propiedades que hacen posible garantizar el óptimo global:

- Si la región factible está acotada, el problema siempre tiene una solución
- (Ésta es una condición suficiente pero no necesaria para que exista una
- Solución).
- El óptimo de un problema de programación lineal es siempre un óptimo global.
- Si x y y son soluciones óptimas de un problema de programación lineal, entonces cualquier combinación (lineal) convexa de los mismos también es una solución óptima.
- La solución óptima se alcanza siempre, al menos, en un punto extremo de la región factible. [4]

Las formulaciones de un problema de programación lineal, su solución y análisis, están sujetos a la forma del problema lineal las cuales detallamos a continuación:

Forma Estándar: se considera forma estándar a la igualación de las restricciones de un modelo determinado, sea a través del incremento de variables de amplitud, o bien la reducción de variables de exceso. Su base de partida para resolverlo es con el método Simplex.

$$\begin{aligned} \min(\max) : Z &= c^T x \\ s.t. \quad Ax &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Forma Canónica: esta forma es útil para la interpretación económica – Dual. Por ello, cuando hablamos de la interpretación económica dual nos referimos al precio sombra o precio dual, lo que significa que por cada unidad en que se aplique la relajación, por cada restricción relacionada, se lograría mejorar la función objetivo en ese valor (y viceversa) sin que cambie la base.

$$\begin{array}{ll} \max : Z = c^T x & \text{o:} \\ \text{s.t. } Ax \leq b & \\ x \geq 0 & \end{array} \quad \begin{array}{ll} \min : Z = c^T x & \\ \text{s.t. } Ax \geq b & \\ x \geq 0 & \end{array}$$

Es decir, que para que un problema de programación lineal sea considerado bajo la forma canónica debe cumplir las siguientes condiciones:

- La función objetivo debe ser de maximización o minimización.
- Las restricciones son del tipo \leq o \geq .
- Las variables de decisión son mayores o iguales a cero.

2.3.2. MÉTODO SIMPLEX

La solución óptima de un programa lineal siempre está asociada con un punto esquina del espacio de soluciones. Este resultado es la clave del método símplex algebraico y general para resolver cualquier modelo de programación lineal.

Conocido como un método algebraico desarrollado en 1947 por George Dantzing el cual consiste en ir encontrando una solución óptima a lo largo del proceso comenzando en una solución inicial hasta obtener la solución óptima, mediante la manipulación de variables sea incluyéndolas o eliminándolas. Por ello, una propiedad general del método símplex es que resuelve la programación lineal en iteraciones.

Para estandarizar, la representación algebraica del espacio de soluciones de programación lineal se forma bajo dos condiciones:

1. Todas las restricciones (excepto las de no negatividad) son ecuaciones con lado derecho no negativo.
2. Todas las variables son no negativas.

El método símplex implica cálculos tediosos y voluminosos, lo que hace que la computadora sea una herramienta esencial para resolver los problemas

de programación lineal. Por consiguiente, las reglas computacionales del método símplex se adaptan para facilitar el cálculo automático. [5]

Cada solución básica está asociada a un vértice del poliedro. El algoritmo del simplex construye una ruta desde el vértice inicial moviéndose a través de las aristas del poliedro hasta el vértice óptimo.

Para aplicar el método Simplex se requiere considerar:

- Las desigualdades deben ser igualdades.
- Todas las variables binarias $b_i \geq 0$.
- El modelo debe tener únicamente variables de holgura.

Los pasos del método Simplex son los siguientes:

- 1.- Utilizando la forma estándar determinar una solución básica factible igualando las $m-n$ variables a cero (el origen).
- 2.- Seleccionar la variable de entrada que a incrementar su valor pueda mejorar el valor de la función objetivo cuando no existe esta situación la solución actual es la óptima, si no ir al siguiente paso.
- 3.- Seleccionar la variable de salida.
- 4.- Determinar la nueva solución básica factible al hacer la variable de entrada en básica. [6]

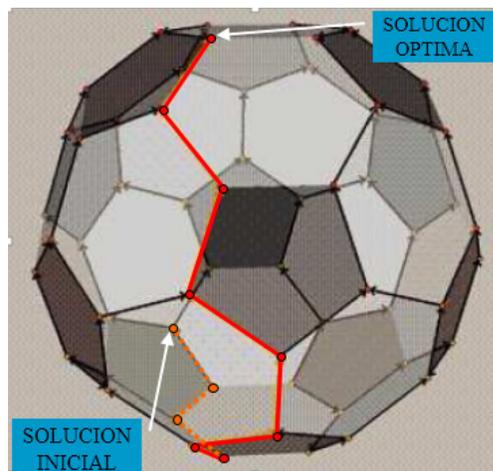


Figura 2.1: Método Simplex de un modelo LP
Fuente: Lenguaje de la Programación Lineal, Sandoya, 2012.

2.4. RELAJACIONES Y HEURÍSTICAS

2.4.1. HEURÍSTICAS

“Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución” [7].

Lakatos lo define como un conjunto de reglas metodológicas que sugieren cómo proceder y qué problemas evitar a la hora de generar soluciones y elaborar hipótesis. En otros términos este concepto se ha generalizado definiéndolo como un procedimiento y técnica para resolver problemas específicos en un limitado conjunto de soluciones por lo que sus resultados no son óptimos pero sus procedimientos se adaptan a las restricciones que un problema pueda presentar acercándonos a la respuesta más factible aunque no tan buena a través de un medio computacional costoso, es una guía sobre qué camino tomar al tener varias opciones. [8]

2.4.2. TIPOS DE HEURÍSTICAS

En términos coloquiales podemos decir que un problema de optimización difícil es aquel para el que no podemos garantizar el encontrar la mejor solución posible en un tiempo razonable. La existencia de una gran cantidad y variedad de problemas difíciles, que aparecen en la práctica y que necesitan ser resueltos de forma eficiente, impulsó el desarrollo de procedimientos eficientes para encontrar buenas soluciones aunque no fueran óptimas. Estos métodos, en los que la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida, se denominan heurísticos o aproximados. En contraposición a los métodos exactos que proporcionan una solución óptima

del problema, los métodos heurísticos se limitan a proporcionar una buena solución del problema no necesariamente óptima. Lógicamente, el tiempo invertido por un método exacto para encontrar la solución óptima de un problema difícil, si es que existe tal método, es de un orden de magnitud muy superior al del heurístico (pudiendo llegar a ser tan grande en muchos casos, que sea inaplicable). [7]

Las principales clases de métodos heurísticos son los siguientes:

- **Heurística Constructiva:** Consiste en construir literalmente paso a paso una solución del problema. Usualmente son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección en cada iteración. Estos métodos han sido muy utilizados en problemas clásicos como el del viajante.

- Algoritmos glotonos o Greedy

- **Heurística de Búsqueda Local:** los procedimientos de búsqueda o mejora local comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El procedimiento realiza en cada paso un movimiento de una solución a otra con mejor valor. El método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible que la mejore.

- Recocido Simulado

- Búsqueda Tabú

- GRASP

- **Heurísticas Evolutivas:** Los métodos evolutivos están basados en poblaciones de soluciones. A diferencia de los métodos clásicos de mejora basados en seguimiento de trayectorias, en cada iteración del algoritmo no se tiene una única solución sino un conjunto de éstas. Estos métodos se basan en generar, seleccionar, combinar y reemplazar un conjunto de soluciones. Dado que mantienen y manipulan un conjunto en lugar de una única solución a lo largo de todo el proceso de búsqueda

suelen presentar tiempos de computación sensiblemente más altos que los de otros metaheurísticos. [9]

- Algoritmos Genéticos

- Algoritmos de Dispersión (Scatter Search)

- **Nuevas Heurísticas:** toman comportamientos de seres vivos que interactúan de manera local con su ambiente, y de esa interacción surgen comportamientos sociales que permiten a estos seres, simples de manera individual, resolver problemáticas complejas de manera conjunta. [10]

- Redes Neuronales

- Colonia de Hormigas

2.4.3. RELAJACIÓN

Las metaheurísticas de relajación se refieren a procedimientos de resolución de problemas que utilizan relajaciones del modelo original, es decir, modificaciones del modelo que hacen al problema más fácil de resolver que el original MIP.

Una relajación de un problema es un modelo simplificado obtenido al eliminar, debilitar o modificar restricciones u objetivos del problema real. En cualquier formulación siempre existe algún grado de simplificación, lo que puede afectar en mayor o menor medida al ajuste a la realidad de los procedimientos de resolución y de las soluciones del problema propuestas. Los modelos muy ajustados a la realidad suelen ser muy difíciles de resolver, y sus soluciones difíciles de implementar exactamente, por lo que se acude a modelos relajados. Las metaheurísticas de relajación son estrategias para el empleo de relajaciones del problema en el diseño de heurísticas. [11]

2.4.4. TIPOS DE RELAJACIONES

RELAJACION EN CONTINUO O RELAJACION LP

La relajación en contínuo de un problema (MIP) es el programa lineal (LP) obtenido del relajamiento de las restricciones de integralidad de las variables de decisión.

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= C^T X \\ \text{s.t. } AX &\leq b \\ X &\geq 0; \quad x_j \in Z, j \in J \end{aligned}$$

(MIP)

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= C^T X \\ \text{s.t. } AX &\leq b \\ X &\geq 0 \end{aligned}$$

(LP)

RELAJACIÓN LAGRANGEANA

La Relajación Lagrangeana (RL(λ)) de un problema (MIP), asociada a un multiplicador λ es el modelo en el cual se han eliminado las restricciones que hacen "difícil" resolver el problema original (MIP).

Donde las restricciones $AX \leq b$ representan las restricciones difíciles del problema.

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= C^T X \\ \text{s.t. } AX &\leq b \\ A'X &\leq b' \\ X &\geq 0; \quad x_j \in Z, j \in J \end{aligned}$$

(MIP)

$$\forall \lambda \geq 0 \left\{ \begin{aligned} \text{Max } z &= C^T X + \lambda(b - AX) \\ \text{s.t. } A'X &\leq b' \\ X &\geq 0; \quad x_j \in Z, j \in J \end{aligned} \right.$$

(RL(λ))

2.5. PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA (MIP)

El modelo de programación entera mixta es un problema de programación lineal donde algunas de sus variables son enteras o también puede estar compuesto por variables binarias, es por ello que también se lo conoce como un problema de optimización híbrido. Este tipo de modelos permiten

representar sistemas complejos que en ocasiones pueden tonarse imposibles de resolver.

Un ejemplo de este modelo MIP es la localización de plantas donde existe la variable binaria la misma que permite tomar una decisión basada en cero y uno es decir sí o no, por ejemplo si se construye una planta en cierto lugar dentro de los distintos lugares posibles.

De manera general podemos describir una formulación de un problema de programación lineal entera mixta como la mostrada en la Figura 2.2 Formulación de un problema de programación lineal entera mixta. En la cual, las variables $x^{(1)}$ corresponden a las variables continuas (que pueden tomar cualquier valor real), mientras que las variables $x^{(2)}$ corresponden a las variables enteras (que sólo pueden tomar valores enteros), y las variables y identifican a las variables binarias. [2]

$$\min Z = c^{(1)T} x^{(1)} + c^{(2)T} x^{(2)} + a^T y$$

$$s. a. \quad A_1 x^{(1)} \leq b^{(1)}$$

$$A_2 x^{(2)} \leq b^{(2)}$$

$$By \leq b$$

$$x^{(1)}, x^{(2)} \geq 0, \quad x^{(1)} \in IR, \quad x^{(2)} \in Z, \quad y \in \{0, 1\}$$

Figura 2.2 Formulación de un problema de programación lineal entera mixta

2.5.1. MÉTODOS DE RESOLUCION DE PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA (MIP)

En ingeniería los problemas más frecuentes son los problemas de programación lineal entera-mixta. Estos problemas proporcionan un marco de modelado flexible y eficiente para formular y resolver muchos problemas de ese entorno.

Dos de las técnicas más utilizadas para la resolución de los problemas de programación entera mixta son: La técnica de ramificación y acotación (RA) y la técnica de los cortes de Gomory (CG). La técnica RA es la utilizada más habitualmente por sus buenas propiedades computacionales. [4]

A continuación se detallan las técnicas conocidas y utilizadas para la resolución de los modelos de programación entera mixta:

- Branch and Bound (Ramificación y acotamiento).
- Método de los planos de corte de Gomory (CG).
- Métodos 'especiales' para problemas de estructura particular.
- Métodos basados en la teoría poliedral.

2.5.2. EL MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTACIÓN (BRANCH AND BOUND)

Este método también es conocido por sus términos en Inglés Branch and Bound, el algoritmo consiste en crear un problema menos restringido usando relajaciones lineales que consisten en eliminar algunos valores enteros y binarios en las variables, y en la aplicación de cotas para el óptimo.

El mecanismo de ramificación aumenta y disminuye progresivamente el valor de la cota superior, la diferencia entre estas cotas es una medida de la proximidad de la solución actual a la óptima, si la misma existiera.

En otras palabras para interpretar su técnica usaremos la siguiente analogía: al método B&B se lo compara con un árbol lleno de soluciones donde cada

rama cumple la función de ser una posible solución óptima mejor que la anterior y al mismo tiempo ir encontrando en qué rama o en términos propios del método en que ramificación las soluciones obtenidas ya no están siendo óptimas, para en ese momento tomar la decisión de ir eliminando o en este caso de la analogía ir «podando» esa rama del árbol que no es óptima y evitar el desgaste de recursos y procesos en los casos donde se apartan de la solución óptima. [12]

2.5.3. ESTRUCTURA DEL ALGORITMO B&B PARA UN MIP

1.- Iniciación: Se establece una cota superior (∞) y una cota inferior ($-\infty$) de la solución óptima. Se resuelve el problema de programación lineal entera mixta inicial relajando las restricciones de integralidad. Se actualiza el valor de la cota inferior con el valor de la función objetivo del problema relajado.

2.- Elegir un nodo/sub problema activo, del que se haya resuelto su relajación lineal y ésta nos dé una solución óptima relajada con alguna variable fraccionaria.

3.- Ramificación: ramificar en una de las variables fraccionarias, creando dos nuevos sub problemas hijos, y resolver sus relajaciones lineales para cada una:

- Si no es factible: podar el nodo por no factibilidad.
- Si da una solución entera: podar el nodo por optimalidad, y actualizar la solución entera de referencia (la mejor disponible).
- Si el valor óptimo de la relajación es menor o igual que el valor de la solución entera de referencia, podar el nodo por acotación.

4.- Actualizar las cotas (acotar): Si la solución del problema actual satisface las condiciones de integralidad y el valor óptimo de su función objetivo es menor que la cota superior actual, la cota superior se actualiza al valor óptimo de la función objetivo del problema resuelto, y el minimizador actual se almacena como el mejor candidato a minimizador del problema original.

Si, por el contrario, la solución obtenida no satisface las restricciones de integralidad y el valor de la correspondiente función objetivo está entre las cotas inferior y superior, se actualiza el valor de la cota inferior al valor de la función objetivo del problema resuelto y se procede a ramificar. [4] [13]

2.5.4. EJEMPLO DE RESOLUCIÓN POR EL MÉTODO B&B

$$(MIP): z = \max 8x_1 + 11x_2 + 6x_3 + 4x_4$$

sujeto a

$$5x_1 + 7x_2 + 4x_3 + 3x_4 \leq 14$$

$$x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, 4$$

Comenzamos resolviendo su relajación lineal:

$$(LP): z_{LP} = \max 8x_1 + 11x_2 + 6x_3 + 4x_4$$

sujeto a

$$5x_1 + 7x_2 + 4x_3 + 3x_4 \leq 14$$

$$x_j \leq 1, j = 1, \dots, 4$$

$$x_j \geq 0, j = 1, \dots, 4.$$

Esta tiene como solución óptima:

$x_{LP} = (1, 1, 1/2, 0)$, con valor objetivo $z_{LP} = 22$ \$. Así, hemos obtenido la primera cota superior en el óptimo de (MIP), dada por $\bar{z} = z_{LP} = 22$.

Por ahora no disponemos de ninguna cota inferior, ya que no hemos obtenido ninguna solución entera factible. Indicamos esta información en la representación del nodo raíz mostrada en la

Figura 2.3: El nodo raíz y su primera cota inferior \bar{z} .

$$\bar{z} = 22$$

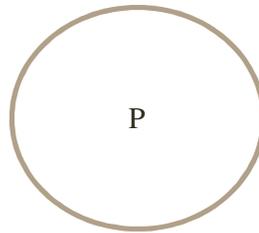


Figura 2.3: El nodo raíz y su primera cota inferior \bar{z} .

A continuación, ramificamos al primer nivel en la variable con valor fraccionario en la solución relajada, x_3 , creando los dos nodos/sub problemas hijos $P(\cdot, \cdot, 0, \cdot)$ y $P(\cdot, \cdot, 1, \cdot)$, como muestra la Figura siguiente:

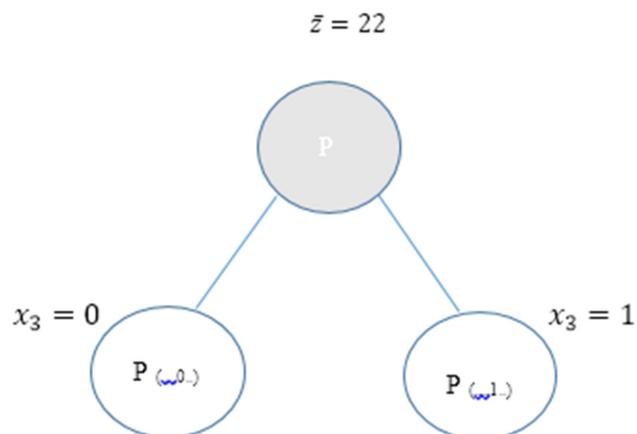


Figura 2.4: Ramificando al primer nivel en x_3

Continuando con el procedimiento resolvemos las relajaciones lineales y actualizamos las cotas.

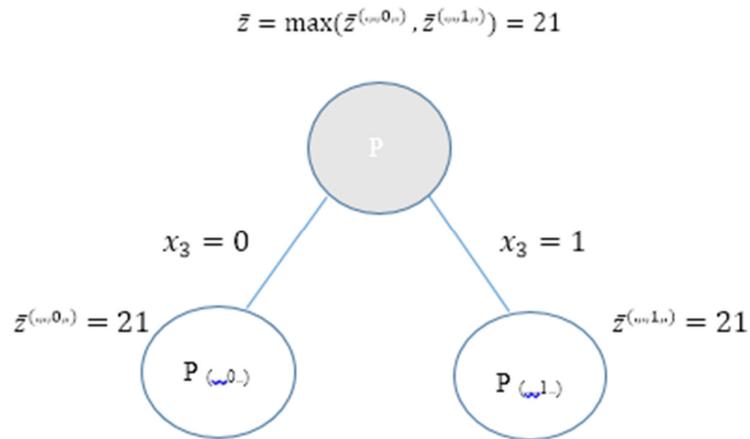


Figura 2.5: Resolución de las relajaciones lineales y actualización de cotas.

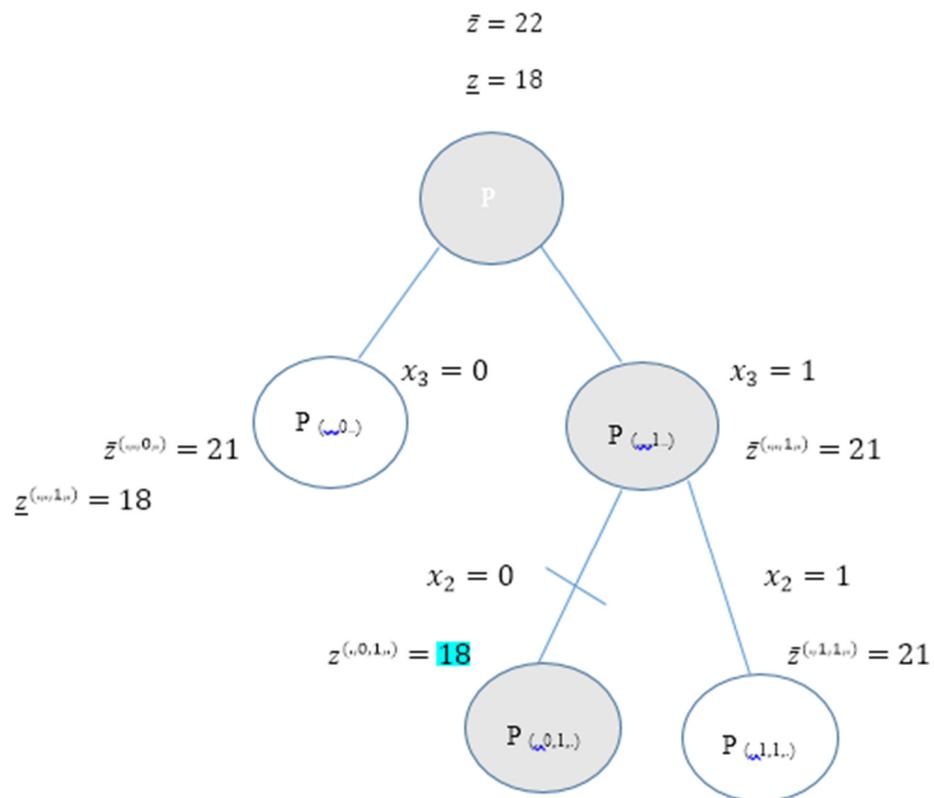


Figura 2.6: Resolución de relajaciones, actualización de cotas, y poda de $P_{(.,0,1,.)}$.

Como ésta es la única solución entera factible disponible hasta ahora, será nuestra solución entera de referencia, y nos dará la cota inferior de 18 \$ para el valor óptimo de (MIP).

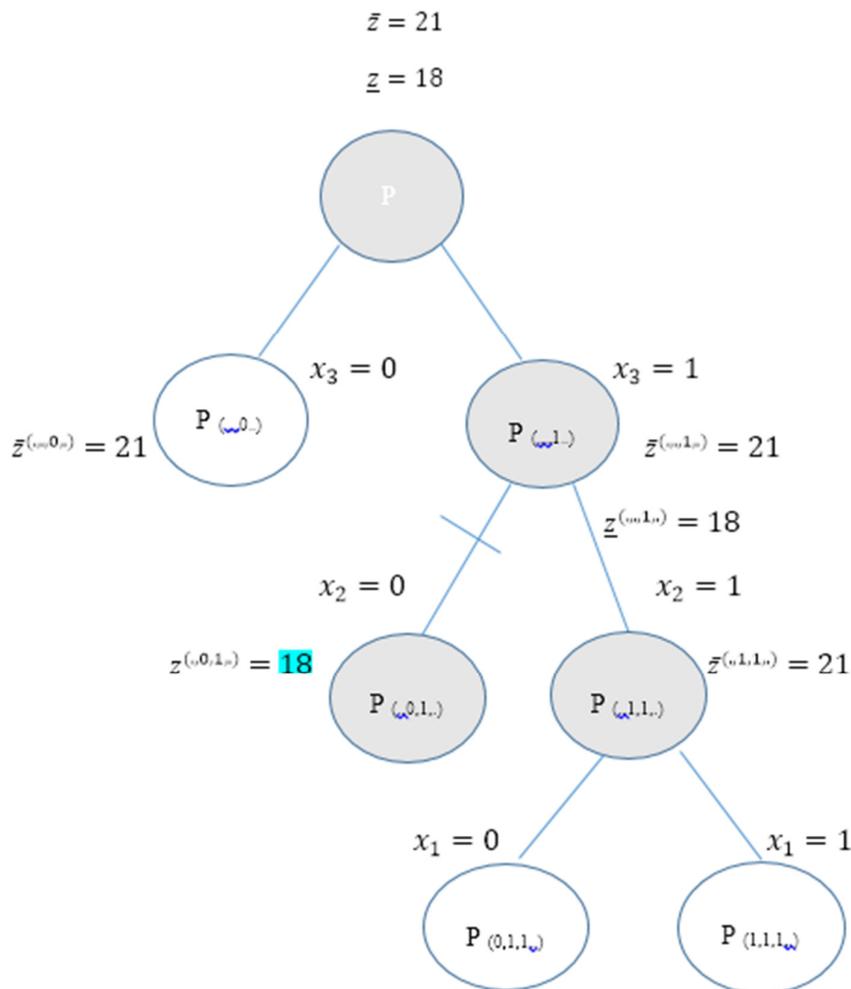


Figura 2.7: Ramificando el sub problema P(.,1,1,.) en la variable x_1 .

Finalmente observamos en el árbol de la siguiente figura que ya no quedan nodos activos: las cotas inferior y superior en el nodo raíz coinciden, con el valor 21 \$. Por tanto, la solución entera factible de referencia, (0, 1, 1, 1), es el óptimo buscado. Nótese que para obtener tal conclusión sólo hemos tenido que explorar una porción relativamente pequeña del árbol completo. [13]

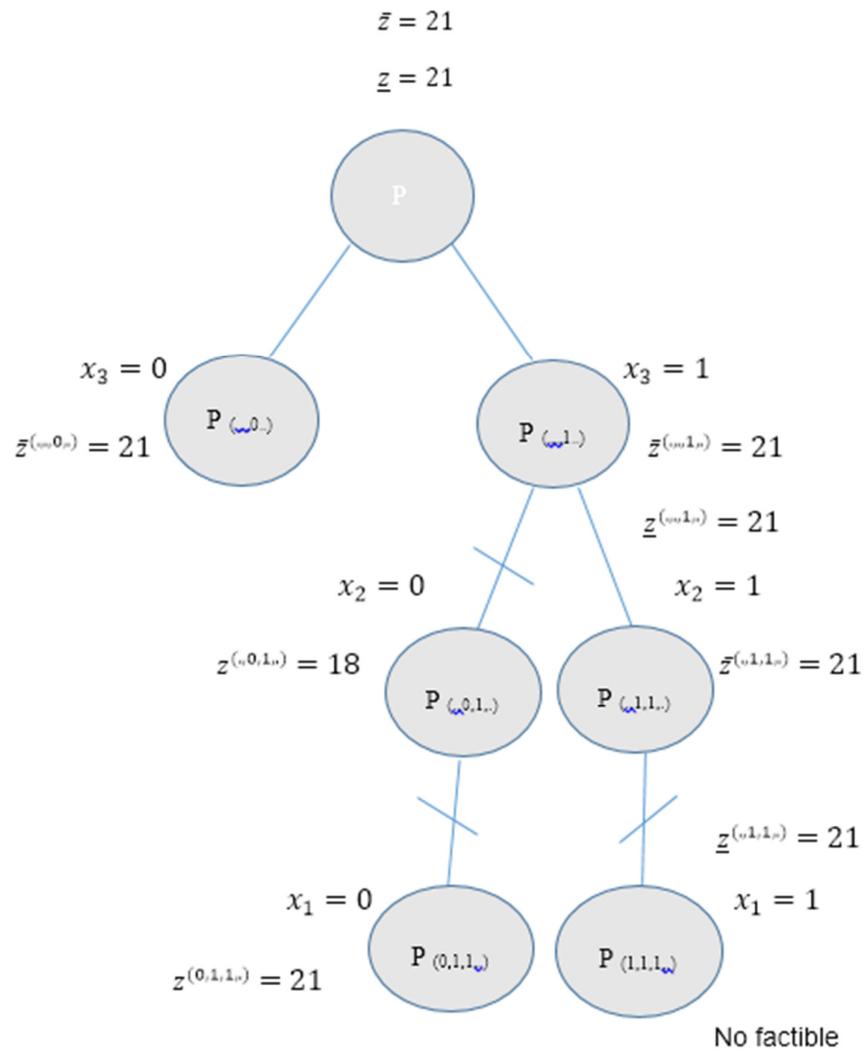


Figura 2.8: Árbol final con actualización de cotas y poda de P (0,1,1), P (1,1,1), y P (...0).

2.6. PLANTEAMIENTO DE UN MODELO MATEMÁTICO

2.6.1. MODELO

Un modelo es una representación matemática de los hechos o una situación natural expresada en forma numérica a través de variables que mantienen una relación entre sí. Por ende modelar es construir un modelo que ajuste una realidad. Durante el desarrollo de un modelo intervienen dos agentes el modelador y el experto; siendo el modelador aquel encargado de la estructuración y desarrollo del modelo, y el experto aquel conocedor de la realidad del problema a modelar. Un modelo debe considerar todos los detalles con el fin de encontrar técnicas de solución factibles basándose en el análisis de los datos, establecimiento de las suposiciones y desarrollo o uso de un algoritmo exacto de solución.

El objetivo de un modelo es servir como una herramienta de ayuda para la toma de decisiones.

2.6.2. ESTRUCTURA DE UN MODELO

Identificación del problema.- comprende la recolección y análisis de los datos importantes para la estructuración del problema.

Especificación matemática y formulación.- es la escritura numérica del problema, en esta fase se definen las variables, las restricciones, la función objetivo y los parámetros para la formulación del problema.

Resolución.- consiste en el diseño e implantación del algoritmo para la obtención de la solución óptima satisfactoria. El algoritmo puede ser de propósito general o específico.

Verificación, validación y distinción.- esta fase consiste en la depuración del modelo, es decir verificar y validar las simplificaciones que se hayan realizado a través de los resultados obtenidos, los mismos que deben ser comparados con situaciones anteriores acorde a la realidad, para que finalmente permitan obtener una respuesta eficaz.

Interpretación y análisis de los resultados.- esta fase consiste en presentar las diversas soluciones, proponer varios escenarios con soluciones atractivas y garantizar la calidad de la solución óptima.

Formación, documentación y mantenimiento.- la principal parte del ciclo de vida de un modelo no está en el desarrollo sino en su uso y mantenimiento, es por ello que esta fase es primordial ya que implica garantizar la difusión del modelo documentada en un manual claro y preciso que facilite el mantenimiento.

2.6.3. LENGUAJE DEL MODELADO

Lenguajes algebraicos de modelado

Son lenguajes de alto nivel diseñados para el desarrollo e implementación de un modelo de optimización, permiten cambiar sin dificultad las dimensiones del modelo, de forma natural separan datos de resultados. Desde el punto de vista del modelador permiten la detección de errores de consistencia en la definición y verificación del modelo. Desde el punto de vista del usuario simplifican su mantenimiento. [14]

Entre los lenguajes de modelado más conocidos se pueden mencionar:

GAMS: www.gams.com

AMPL: www.ampl.com

XPRESS: www.dash.co.uk

El campo de actuación y utilidad de los modelos de optimización se ha ampliado tremendamente al utilizar estos lenguajes. Entre sus características y ventajas principales destacan las siguientes:

- Proporcionan una formulación sencilla de modelos grandes y complejos.

- Facilitan sobremanera el desarrollo de prototipos.
- Mejoran sustancialmente la productividad de los modeladores al permitir dedicar más tiempo al diseño, ejecución del modelo y análisis de los resultados y menos a la codificación del mismo.
- Estructuran los buenos hábitos de modelado al exigir una representación concisa y exacta de los parámetros, variables y sus relaciones.
- Recogen simultáneamente la estructura del modelo y su documentación.
- Separan de manera natural los datos de la estructura del modelo y ésta de los algoritmos de solución.
- La formulación del problema es independiente del tamaño. Permiten el uso de la estructura del modelo para diferentes casos. Una manera habitual de desarrollar es utilizar una maqueta para la depuración y verificación del modelo y una vez comprobada su validez utilizar el caso real a ser resuelto.
- Los optimizadores pueden ser intercambiados sin dificultad, se pueden probar nuevos optimizadores, nuevos métodos o nuevas versiones.
- Por ejemplo, en el lenguaje GAMS se encuentran entre otros disponibles los optimizadores CPLEX, OSL, XA y XPRESS para problemas LP y MIP, MINOS y CONOPT para problemas NLP, DICOPT para problemas MINLP y MILES y PATH para problemas MCP.
- Permiten la realización de cambios en el modelo de manera sencilla y segura, es decir, se puede afrontar un refinamiento continuo en la formulación del problema.
- Cualquier tipo de problemas de programación lineal, no lineal, flujos en redes o mixta complementaria resulta muy fácil implantar su formulación.
- Permiten la implantación de algoritmos avanzados, que incluyan varias llamadas al optimizador o procedimientos específicos para el problema (como por ejemplo los métodos de descomposición).
- Permiten la portabilidad de los modelos entre plataformas y sistemas operativos. [14]

Un lenguaje de modelado permite utilizar diferentes optimizadores para la resolución de un mismo problema de optimización. Esta característica

representa una gran ventaja por la flexibilidad que aporta en la selección del optimizador más adecuado a las características del problema. Entre los optimizadores a los que se ha tenido acceso destacan CPLEX y OSL para LP, MINOS y CONOPT para NLP y MILES y PATH para MCP. Siendo CPLEX probablemente el mejor optimizador en la actualidad para problemas LP y MIP.

El mejor método para un problema concreto depende de las características del problema, de los detalles de implantación del método simplex o del punto interior y del ordenador utilizado. Por esta razón los paquetes comerciales de LP importantes incluyen métodos de punto interior (habitualmente primal-dual predictivo-correctivo), métodos simplex (en su versión primal y dual) y de resolución de flujos de redes (simplex de red). Se debe utilizar el método de optimización (punto interior o barrera, simplex primal o simplex dual) más adecuado al tipo o tamaño del problema. La selección de un método u otro se debe realizar principalmente en función del tamaño del problema.

El método simplex también resulta adecuado en la realización de análisis de sensibilidad, es decir, cuando se trata de resolver problemas similares disponiendo de una solución próxima y una base previa, como sucede en el método de ramificación y acotamiento para resolver problemas lineales enteros.

A continuación se presenta la Tabla 2.1 Comparación entre diferentes optimizadores en un problema LP de comparación entre varios optimizadores y métodos de optimización.

Optimizador	Método	Tiempo	Índice	Iter.
CPLEX	Punto Interior	41.8	1.0	32
	Simplex Dual	99.8	1.4	12692
	Simplex Primal	156.2	3.7	21622
MINOS 5.3	Simplex Primal	1863.6	44.6	23927
	Punto Interior	163.9	3.9	10798
OSL 2.1	Simplex Primal	530.9	12.7	12685

Tabla 2.1 Comparación entre diferentes optimizadores en un problema LP
Fuente: Modelos Operativos de Gestión, Begoña, 2009.

Las diferencias en tiempo de resolución que pueden encontrarse entre métodos de optimización o entre implantaciones de un mismo método llegan a ser significativas (de hasta 45 veces para una comparación entre CPLEX 6.0 utilizando un método de punto interior y MINOS 5.3 utilizando el método simplex para un problema de 19000 restricciones, 28000 variables y 82000 elementos no nulos). Para un mismo método de optimización se han encontrado diferencias de hasta 3 veces entre implantaciones. [14]

2.6.4. GAMS (GENERAL ALGEBRAIC MODELING SYSTEM)

Uno de los lenguajes de software más conocido es GAMS siendo este el más antiguo pero con el mayor número de usuarios, desarrollado por A. Brooke, D. Kendrick y A. Meeraus. GAMS permite definir, analizar y resolver problemas de optimización. [4]

Este programa permite muchas interrelaciones con otros lenguajes de alto nivel (Fortran, C etc.), así como la aplicación de diversos algoritmos de resolución. En la actualidad se están desarrollando nuevas versiones de GAMS que permiten importar y exportar datos con hojas de cálculo, que son herramientas de uso muy común en las tareas informatizadas.

Para poder ejecutar el programa GAMS es necesario crear un archivo de datos donde recoger toda la información necesaria del problema, aunque todo ello introducido en un formato particular. GAMS-IDE incorpora un editor que facilita la escritura y resolución de los problemas.

En los archivos de modelos, hay que organizar una serie de bloques que son obligatorios y otros bloques que son opcionales.

- Los bloques obligatorios son:

Variables	VARIABLES
Ecuaciones	EQUATIONS
Modelo	MODEL
Solución	SOLVE

- Los bloques optativos son:

Conjuntos	SET
Datos	DATA
Visualización	DISPLAY

GAMS como todo programa de uso profesional incorpora la opción de búsqueda de una solución buena en poco tiempo antes que la óptima usando muchos recursos, es decir, GAMS detiene el proceso de búsqueda en aquellas soluciones que difieran menos de un 10 por ciento de la mejor solución. Esto queda reflejado en el fichero LST. Si se quiere encontrar una mejor solución (más cercana al óptimo, o el óptimo mismo), solamente hay que incorporar la opción de que la tolerancia sea muy baja, por ejemplo un 0.00001 (0.001 por ciento). [13]

CAPÍTULO III

3. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

3.1 INTRODUCCIÓN

Para comprender la situación actual de la compañía necesitamos conocer previamente cuál es el proceso actual, en qué consisten sus diferentes fases y la terminología utilizada en este tipo de actividad.

Los términos usuales en la actividad son los siguientes:

Cabezal: al tracto camión de 2 o 3 ejes sin remolque.

Arrastre: al semirremolque o carrocería donde se coloca el contenedor para ser transportado.

Unidad de transporte: es el conjunto que se forma entre el cabezal y el arrastre, es decir el camión o tráiler listo para el retiro de la carga.

Operador: al proveedor subcontratado para dar servicio de transporte.

Viaje: recorrido que realiza la unidad de transporte desde el puerto marítimo con el contenedor con producto hacia la bodega del cliente, y luego hacia la entrega del contenedor vacío en el patio de la naviera.

Demora: cuando el contenedor vacío no es entregado dentro del período que otorga la naviera, es decir, dentro del rango de fecha establecido a través de la carta de autorización, por lo cual la entrega posterior a la fecha registrada en la carta se denomina demora o conocida también con el tecnicismo *demoraje*.

Naviera: entidad encarga de las embarcaciones que ingresan al país a través de los embarques marítimos donde se transportan los contenedores.

Patio de la naviera: es el espacio físico donde deben todos los contenedores vacíos ser entregados una vez finalizado el descargue del

producto, cada naviera tiene su propio patio asignado para recibir el contenedor vacío y almacenarlo.

Patio logístico: es el espacio físico que pertenece a la compañía de transporte donde pueden ser bajados los contenedores vacíos al momento de necesitar los equipos de arrastres disponibles. Este patio no pertenece a la naviera.

Desenganche: se denomina desenganche a la acción de separar el cabezal del equipo de arrastre.

Retorno: se denomina retorno al proceso de devolución del contenedor vacío.

Operación: se denomina operación a la acción de coordinar el viaje, ejecutarlo a través de la asignación de la unidad de transporte, entregar el contenedor vacío, y finalmente obtener el margen rentable operativo.

3.2. SITUACIÓN ACTUAL

La empresa en estudio es una compañía dedicada a la actividad del servicio de transporte terrestre de carga pesada transportada en contenedores que cubre rutas a nivel nacional.

El proceso inicia cuando el cliente, que figura en esta operación como el importador, trae su carga desde el exterior en contenedores hasta cualquiera de los puertos marítimos ubicados en la ciudad de Guayaquil, este contenedor luego de cumplir el proceso de desaduanización debe ser retirado por el cliente desde el puerto marítimo con destino hacia sus instalaciones, que pueden ser dentro de la ciudad o, en cualquier otra provincia del país, este retiro puede ser realizado por compañías de transportes autorizadas a ingresar al puerto marítimo, las cuales se dedican a esta actividad; por otro lado el contenedor es considerado un recipiente que contiene la mercadería del cliente en su interior, el mismo que tiene una

fecha de vigencia para transitar en el país, el período de tránsito puede variar desde 7 hasta 21 días, según lo establecido entre el cliente y la compañía naviera.

El papel que cumple la naviera en este proceso es el de dueño del contenedor, el mismo que es alquilado al cliente importador por un período determinado, una vez retirado el contenedor del puerto y trasladado hasta la bodega del cliente, éste es descargado; es decir, toda la mercadería es desalojada desde el recipiente, dejando el contenedor completamente vacío. Luego el contenedor vacío debe ser devuelto a la naviera, la cual dispone de patios para realizar las recepciones de estos contenedores vacíos. Esta operación se realiza mediante el uso de un vehículo con arrastre para su transporte, que tiene asociados costos fijos y variables significativos dentro de la estructura de la organización, y cuya optimización es un objetivo relevante para la competitividad de la empresa.

A ese proceso se lo conoce como el retorno de vacíos, el mismo que consiste en devolver el contenedor vacío al patio de la naviera dentro del período establecido por ambas partes naviera y cliente importador, este período es asentado a través de una carta de autorización expedida por la naviera al cliente.

Finalmente el contenedor vacío es entregado en el patio de la naviera y ahí finaliza el proceso de importación, transporte y retorno del contenedor para el importador y la compañía de transporte.

Esquemáticamente se puede observar la estructura de este proceso en la Figura 3.1: Proceso actual.:



Figura 3.1: Proceso actual.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. PROCESO DE RETORNO PARA EL CONTENEDOR VACÍO

Actualmente para el retorno del contenedor vacío existen otros sub procesos que se han originado debido al tipo de negocio y la operatividad del transporte, los cuáles vamos a exponer a continuación:

3.3.1. RETORNO GENERAL

El retorno general consiste en la entrega del contenedor vacío, realizada por la misma unidad de transporte que retiró el contenedor desde el puerto marítimo, lo trasladó a la bodega del cliente, lo descargó y entregó el contenedor vacío al patio de la naviera, es decir que toda la operación fue realizada con la misma unidad de transporte. Este proceso de retorno es el mayormente utilizado por la empresa de transporte ya que permite obtener

un margen rentable mayor por el viaje realizado, denominamos viaje a la operación del retiro del contenedor importado full hasta la entrega del vacío.

3.3.2. RETORNO CON SUB CONTRATACIÓN DE PROVEEDOR SIN ARRASTRE

Esta operación de retorno consiste en sub contratar un proveedor ajeno a la flota propia de la empresa, para que se encargue de la entrega del contenedor vacío hasta su respectivo patio, la compañía de transporte incurre en esta sub contratación cuando necesita que su unidad realice un segundo viaje el mismo día y debido al factor tiempo tanto en la entrega del vacío, como en el turno asignado por el puerto, se toma la decisión de dejar el contenedor vacío desenganchado en los patios propios de la compañía, a fin de que venga el operador sub contratado, el cual contará solo con su cabezal, es decir sin el arrastre y por tanto deberá enganchar el arrastre propio de la empresa que contenga el contenedor vacío para ser entregado.

Esta operación adicional de sub contratación tiene asociado los siguientes costos que se muestran en la

Tabla 3.1: Costos proveedor sub contratado para el retorno de los vacíos sin arrastre.

PROVEEDOR	RUTA SUR	RUTA NORTE
Costo del operador sub contratado para entregar el contenedor vacío sin arrastre por unidad	\$ 30	\$ 35

Tabla 3.1: Costos proveedor sub contratado para el retorno de los vacíos sin arrastre

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente esquema, representado en la Figura 3.2: Retorno con subcontratación sin arrastre. indica el proceso de retorno general.



Figura 3.2: Retorno con subcontratación sin arrastre.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. RETORNO CON SUB CONTRATACIÓN DE PROVEEDOR CON ARRASTRE

Este proceso de retorno de los contenedores vacíos consiste en subcontratar un proveedor ajeno a la flota propia de la empresa, para que se encargue de la entrega del contenedor vacío hasta el respectivo patio de la naviera. La compañía de transporte incurre en esta subcontratación cuando necesita que su unidad realice un segundo viaje el mismo día, y debido al factor tiempo tanto en la entrega del contenedor vacío como en el turno

asignado por el puerto se toma la decisión de bajar el contenedor vacío en los patios propios de la compañía, a fin de que arribe el operador sub contratado el cual contará con su cabezal y arrastre incluido para que pueda transportar el contenedor vacío.

Además de los costos asociados a la sub contratación del operador, también se deben considerar los costos incurridos en el alquiler de un montacargas, para que esta máquina pueda realizar la operación de bajar el contenedor vacío desde la unidad de transporte hasta el piso, y luego la operación inversa, es decir, el montacargas subirá el contenedor vacío a la unidad de transporte. A estos movimientos, de subida y bajada, se los conoce técnicamente como *handling in* y *handling out*. Esta operación adicional de sub contratación tiene asociado los costos indicados en la

Tabla 3.2: Costos proveedor sub contratado con arrastre para el retorno vacío.

PROVEEDOR	RUTA SUR	RUTA NORTE
Costo del operador sub contratado para entregar el vacío con arrastre por unidad	\$ 35	\$ 40
Alquiler de Montacargas por hora	\$ 20	

Tabla 3.2: Costos proveedor sub contratado con arrastre para el retorno vacío.

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente esquema, representado en la Figura 3.3: Retorno con subcontratación con arrastre. indica el proceso de retorno general.

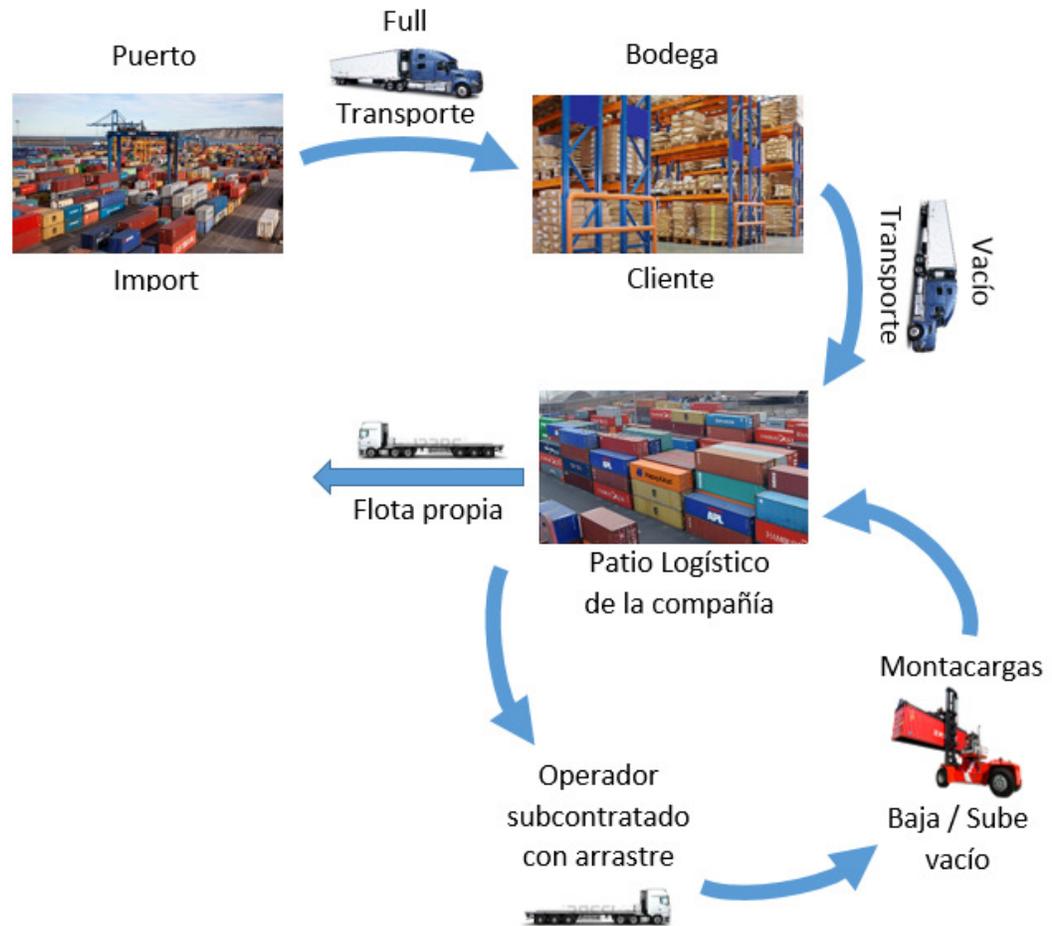


Figura 3.3: Retorno con subcontratación con arrastre.
Fuente: Elaboración propia.

3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los datos utilizados en este estudio fueron proporcionados por el gerente operativo de la compañía de transporte, con estos datos se realizó un primer análisis con el cual se determinó la cantidad de recursos con que cuenta la compañía, la frecuencia de viajes diarios, la cantidad de contenedores vacíos entregados con y sin penalidades, y los costos incurridos en dichas operaciones de retorno. Posteriormente el modelo proporcionará cual escenario será el más conveniente para la compañía con sus respectivos costos y beneficios.

Los datos con los cuales trabajaremos serán en días, con una demanda uniforme.

A continuación se expresa a través de la

Tabla 3.3: Histórico de la demanda el comportamiento de la demanda obtenida en los períodos pasados dentro del historial de la compañía.

Período	N° Operaciones Anuales
2011	16911
2012	16504
2013	20610
2014	16538
2015	21482

Tabla 3.3: Histórico de la demanda
Fuente: Elaboración propia.

A continuación mostramos la demanda en forma ilustrada a través de la siguiente Figura 3.4: Histórico de la demanda de la compañía en estudio..



Figura 3.4: Histórico de la demanda de la compañía en estudio.

Fuente: Base de datos de la compañía proporcionada por el Gerente de Operaciones.

3.5. DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO

Dado que las operaciones de transporte representan una parte importante de la economía de la empresa cualquier ajuste en su estructura de costos tiene un impacto relevante, a partir del siguiente modelo matemático se busca realizar las operaciones de retorno de una manera óptima, en base a lo mencionado se ha diseñado el siguiente modelo matemático, para el cual se consideran dos escenarios de operación de las actividades de la empresa:

ESCENARIO A: El escenario A corresponde a la situación en la cual se determinan los arrastres disponibles para cargar el día siguiente, el uso de la subcontratación de operadores con y sin arrastre, y la determinación de los costos y márgenes rentables.

ESCENARIO B: Con respecto al escenario B se contemplan las mismas características del escenario A, adicionando el uso del montacargas para las gestiones de retorno con operadores sub contratados con arrastre. Por tanto el escenario B es más complejo que el escenario A.

3.5.1. RECURSOS

Actualmente el modelo tiene como objetivo realizar 104 viajes diarios, la flota actual de la empresa está compuesta de 52 cabezales y 66 arrastres, cada cabezal deberá realizar dos viajes diarios.

PERÍODO	# CABEZALES	# / VIAJES
Lunes a Viernes	52	104

Tabla 3.4: Límite de viajes diarios.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada utilizados en el modelo son los siguientes:

- Número de cabezales: 52
- Número de arrastres: 66
- Número de viajes realizados: 104
- Turnos: 2

3.5.3. ÍNDICES DEL MODELO

Los índices utilizados para el diseño del modelo son los mostrados en la

Tabla 3.5: Índices del modelo.:

Índice	Descripción
$k: 1, \dots, 52$	Cabezal
$a: 1, \dots, 66$	Arrastre
$t: 1, 2$	Turnos (mañana y tarde)

Tabla 3.5: Índices del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

El detalle de los valores que toman estos índices se muestran a continuación:

Ítem	Descripción
K1	Cabezal # 1
K2	Cabezal # 2
K3	Cabezal # 3
...	...

Kn	Cabezal # 52
----	--------------

Tabla 3.6: Información de entrada: cabezales.
Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Descripción
a1	arrastre # 1
a2	arrastre # 2
a3	arrastre # 3
...	...
an	arrastre # 66

Tabla 3.7: Información de entrada: arrastres.
Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Descripción
t1	Mañana de 5 am – 10:00
t2	Tarde de 12:00 – 14:00

Tabla 3.8: Información de entrada: turnos.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.4. TABLAS Y PARÁMETROS

Las tablas y parámetros utilizados en el modelo son los mostrados en la

Tabla 3.9: Tablas y parámetros del modelo.

Parámetro	Descripción
Ruta(k,t)	Ruta a seguir por el cabezal k en el turno t (1 si es ruta norte, 0 si es ruta sur).
Pendientes(k,t)	Parámetro que indica si existen contenedores vacíos pendientes por retornar del cabezal k en el turno t (1 si existen, 0 si no).
Penalidad(k,t)	Parámetro que indica si el cabezal k en el turno t incurrió en una demora (1 si incurrió y 0 si no).
Demanda(k,t)	Parámetro que indica si existe demanda de contenedores vacíos para el cabezal k por el turno t (1 si existen, 0 si no).
Venta	Precio del viaje, actualmente \$ 250.
Totalarrastres	Numero de arrastres que dispone la empresa, actualmente 66 unidades.
CostoMontacargaHora	Costo del montacargas por hora, actualmente \$ 20/h
CostoPenalidad	Costo de demora producido por contenedor vacío por día, \$ 50/viaje
CostoSubcontratar	Costo de subcontratar el viaje, \$ 125/viaje
CostoNoSubcontratar	Costo de no subcontratar el viaje, \$ 160/viaje
CostoRutaNorte	Costo de la ruta norte en el caso de subcontratar, \$35/viaje
CostoRutaSur	Costo de la ruta sur en el caso de subcontratar, \$40/viaje

Tabla 3.9: Tablas y parámetros del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.5. VARIABLES DE DECISIÓN

Las variables que se indican en la

Tabla 3.10: Variables de decisión son aquellas que establecen las decisiones que deberá tomar la empresa para optimizar el retorno de contenedores vacíos con el objetivo de minimizar el costo de la operación:

Variable	Descripción
Descargar (t)	Unidades de contenedores vacíos a descargar en el turno t
Total	Total de contenedores vacíos pendientes de entregarse generados en el día.
Demoraje(k,t)	Si existió o no demora en el turno t para el vehículo k
Montacargas(t)	Cantidad de montacargas que se requieren en el turno t , si solo se quiere que se trabaje con ellos 1 hora.
TotalTerceros	Total de operadores a subcontratar.
Carga(k,a,t)	Asignación de un arrastre a al cabezal k en el turno t
Subcontratados(k,t)	Si el viaje del cabezal k fue subcontratado el turno t
NoSubcontratados(k,t)	Si el viaje del cabezal k no fue subcontratado en el turno t

Desenganchados(a,k)	Si el arrastre a fue desenganchado y por tanto no puede ser considerado en un futuro viaje por el cabezal k (solo para el modelo A).
-------------------------	--

Tabla 3.10: Variables de decisión.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.6. FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo de ambos modelos (A y B), busca la minimización de los costos totales diarios involucrados en el proceso de retorno de los contenedores vacíos, y puede ser expresada como en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_{k,t} (\text{Demoraje}(k,t) * \text{Penalidad}(k,t) * \text{CostoPenalidad} \\
 & + \text{Subcontratados}(k,t) \\
 & * (\text{CostoSubcontratar} + (\text{Ruta}(k,t) * \text{CostoRutaNorte}) \\
 & + ((1 - \text{Ruta}(k,t)) * \text{CostoRutaSur})) \\
 & + \text{NoSubcontratados}(k,t) * \text{CostoNoSubcontratar}) \\
 & + \sum_t \text{Montacargas}(t) * \text{MontacargaHora}
 \end{aligned}$$

Donde el primer término corresponde a los costos de demora, más los costos de la operación con el sub contratado por zonas, más los costos de la operación con el sub contratado con montacargas, y finalmente el costo de la operación del viaje normal versus el viaje con extra costos adicionales los cuales son sumados a la operación con respecto al retorno del contenedor vacío.

3.5.7. RESTRICCIONES DEL MODELO

Las siguientes ecuaciones indican las restricciones que rigen la operación del retorno de contenedores vacíos de la empresa, y difieren de acuerdo al escenario considerado: los escenarios A y B son modelizados, respectivamente, a través del modelo A y modelo B.

MODELO A

Res 1.- Capacidad de la demanda: Combinación de los cabezales k con un arrastre a para cumplir un envío, es decir todos los cabezales deberán tener un arrastre asignado en ambos turnos para cumplir con la demanda diaria.

$$Demanda(k, t) = \sum_a Carga(k, a, t), \forall k, t \quad res(1)$$

Res 2.- Capacidad de envío: consiste en el número máximo de arrastres que posee la compañía para cubrir el turno de la mañana.

$$\sum_{k,a} Carga(k, a, Manana) \leq TotalArrastres \quad res(2)$$

Res 3.- Capacidad de envío: consiste en el número máximo de arrastres que posee la compañía para cubrir el turno de la tarde.

$$\sum_{k,a} Carga(k, a, Tarde) \leq TotalArrastres - \sum_{k,a} Restantes(a, k) \quad res(3)$$

Res 4.- Capacidad de asignación arrastre: consiste en asignar a cada arrastre un solo cabezal en cada turno.

$$\sum_a Carga(k, a, t) \leq 1, \forall k, t \quad res(4)$$

Res 5.- Capacidad de asignación cabezal: consiste en asignar máximo un arrastre por cabezal en cada turno.

$$\sum_k Carga(k, a, t) \leq 1, \forall a, t \quad res(5)$$

Res 6.- Total arrastres: consiste en el número máximo de arrastres que pueden ser desenganchados, lo cual se obtiene del total de arrastres menos los que han sido usados actualmente, es decir representa a los arrastres que están con contenedores vacíos pendientes de retornarse al patio de la naviera.

$$TotalArrastres - \sum_{a,k} Carga(k, a, Manana) \geq \sum_{a,k} Desenganchados(a, k) \quad res(6)$$

Res 7.- Desenganche: consiste en asignar que arrastres serán desenganchados con contenedores vacíos en el patio logístico, para que ese arrastre no sea considerado en la asignación para el turno de la tarde.

$$Desenganchados(a, k) \leq Carga(k, a, Manana) * Pendientes(k, t), \forall a, k \quad res(7)$$

Res 8.- Retorno: consiste en contar todos los contenedores vacíos que van hacer descargados en un turno.

$$Descargar(t) = \sum_k Pendientes(k, t) - \sum_k Subcontratados(k, t), \quad \forall t \text{ res(8)}$$

Res 9.- Esta restricción consiste en escoger entre si se subcontrata un operador para el retorno del contenedor vacío o si se deja el contenedor vacío caer en demora quedando pendiente su retorno.

$$Subcontratados(k, t) + Demoraje(k, t) = Pendientes(k, t), \forall k, t \quad \text{res(9)}$$

Res 10.- En esta restricción sí se decidió subcontratar debido a que se desenganchó un arrastre.

$$Demoraje(k, Tarde) = Pendientes(k, Tarde), \forall k \quad \text{res(10)}$$

Res 11.- Consiste en asignar la penalidad demora al contenedor vacío pendiente de retornarse con respecto al turno de la tarde.

$$Subcontratados(k, Manana) = \sum_a Desengachados(k, Manana), \forall k \quad \text{res(11)}$$

Res 12.- Consiste en el retorno general sin subcontratación de operadores, donde el cabezal k retornó el contenedor vacío al patio de la naviera.

$$1 - Subcontratados(k, t) = NoSubcontratados(k, t), \forall k, t \quad \text{res(12)}$$

Res 13.- Consiste en la disponibilidad de los arrastres que están libres para ser utilizados en un segundo viaje, es decir arrastres que no tengan ningún contenedor vacío cargado pendiente de retornarse al patio de la naviera.

$$1 - \text{Desengachados}(a, k) \geq \text{Carga}(k, a, \text{Tarde}), \forall a, k \quad \text{res}(13)$$

Res 14.- Consiste en el total de contenedores vacíos pendientes de ser retornados al patio de la naviera que se generaron en el día.

$$\text{Total}(t) = \sum_k \text{Pendientes}(k, t), \forall t \quad \text{res}(14)$$

Res 15.- Consiste en el número de montacargas que se requiere a utilizarse para bajar los contenedores vacíos desde el arrastre, los cuales no serán retornados el mismo día, y en su lugar se retornarán el día posterior, o serán retornados por tercero a través de la subcontratación en un turno respectivo.

$$\text{Montacargas}(t) \geq \left(\frac{10}{60}\right) * (\text{Descargar}(t)), \forall t \quad \text{res}(15)$$

MODELO B

El modelo B además de las restricciones res 1, 2, 9, 10, 12, 14 que comparten con el modelo A, este modelo involucra la siguiente restricción adicional:

Res 9.- Consiste en el número de montacargas que se requiere a utilizarse para bajar los contenedores vacíos desde el arrastre, los cuales no serán retornados el mismo día, y en su lugar se retornarán el día posterior, o serán

retornados por tercero a través de la subcontratación en un turno respectivo; considerando el uso del montacargas para la bajada del contenedor vacío al piso y posteriormente el uso del montacargas para la subida del contenedor vacío al arrastre para su retorno, el cual será retornado por un operador sub contratado con arrastre.

$$\begin{aligned} \text{Montacargas}(t) \geq & \left(\frac{20}{60}\right) * \left(\sum_k \text{Subcontratados}(k, t)\right) + \left(\frac{10}{60}\right) \\ & * \left(\sum_k \text{Demoraje}(k, t)\right), \forall t \quad \text{res}(9) \end{aligned}$$

3.6. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático es del tipo MIP, y fue implementado en GAMS versión 24.1.3, y ejecutado con el solver Cplex, pues ha demostrado ser el solver más eficiente disponible actualmente, y que incorpora el estado del arte de los algoritmos para resolver modelos MIP. Los resultados computacionales fueron obtenidos al correr el modelo en una máquina con procesador intel corei5 y de 8GB de memoria RAM, con un tiempo de ejecución de menos de 10 segundos. El código que se implementó puede ser revisado en el ANEXO 1.

3.7. INFORME DE LOS RESULTADOS

La solución del modelo MIP se obtuvo con un GAP relativo del 0%, es decir, se alcanzó el óptimo exacto, en ambos modelos, el detalle de los resultados se muestra a continuación:

Cantidad de contenedores vacíos correspondientes al turno de la mañana que podrán ser retornados al patio de la naviera el mismo día con el mismo cabezal que realizó el viaje de origen:

Contenedores vacíos entregados en el turno de la mañana.	29
--	----

Cantidad de contenedores vacíos pendientes de retornar correspondientes al turno de la mañana:

Contenedores vacíos pendientes de retorno	23
---	----

Cantidad de arrastres disponibles para cubrir la demanda del turno de la tarde:

Arrastres disponibles	$14 + 29 = 43$
-----------------------	----------------

Cantidad de arrastres necesarios para cubrir la demanda del turno de la tarde:

Requerimiento de arrastres para cubrir demanda	9
--	---

Cantidad de contenedores vacíos que incurrirán en bajar el contenedor vacío en el patio logístico mediante el uso de montacargas:

Arrastres que serán bajados al piso	9
-------------------------------------	---

Cantidad de operadores a sub contratar para la entrega de los vacíos de la mañana:

# de operadores a sub contratarse	7
-----------------------------------	---

Cantidad de contenedores vacíos correspondientes al turno de la tarde que podrán ser retornados al patio el mismo día con el mismo cabezal que realizó el viaje de origen:

Contenedores vacíos entregados – T tarde	30
--	----

Cantidad de contenedores vacíos pendientes de retornar correspondientes al turno de la tarde:

Contenedores vacíos pendientes de retorno – T tarde	22
---	----

Cantidad de operadores a sub contratar para la entrega de vacíos al siguiente día:

# de operadores a sub contratarse – T tarde pendientes	11
--	----

Cantidad de contenedores vacíos que incurrirán en bajar el vacío en el patio logístico:

# de operadores a sub contratarse	8
-----------------------------------	---

El costo obtenido de la función objetivo en el modelo A fue: \$17,220.00

El costo obtenido de la función objetivo en el modelo B fue: \$17,300.00

A continuación en la

Tabla 3.11: Informe de los resultados obtenidos. se hace un resumen de las variables de decisión en la solución óptima.

Modelo A:		
Fases	Turno de la mañana	Resultados
1	Demanda a cubrir	52
2	Cantidad de arrastres que posee la compañía	66
3	Cantidad de arrastres ocupados en el turno de la mañana	52
4	Cantidad de arrastres libres sin utilizarse en el turno de la mañana	14
5	Cantidad de cabezales que alcanzarán entregar el contenedor vacío en el turno de la mañana	29
6	Cantidad de contenedores vacíos pendientes de ser entregados correspondientes al turno de la mañana	23
7	Cantidad de arrastres disponibles para ser utilizados en el turno de la tarde	43
Turno de la tarde		
8	Demanda a cubrir en el turno de la tarde	52

9	Cantidad de arrastres que se requieren para cubrir la demanda de la tarde	9
10	De los 23 contenedores vacíos pendientes de entregarse del turno de la mañana se obtendrán los 9 que faltan por cubrir la demanda de la tarde.	-
11	Cantidad de contenedores vacíos hacer bajados al piso en el patio logístico mediante el uso de montacargas	9
12	Cantidad de contenedores vacíos aún pendientes de entregarse correspondientes al turno de la mañana	14
13	Cantidad de operadores que debo subcontratar para entregar los contenedores vacíos que tengo pendientes del turno de la mañana durante el mismo día, considerando que un operador sub contratado puede entregar hasta 2 vacíos por turno en este caso estos vacíos se entregarían durante la tarde.	7
14	Cantidad de cabezales que alcanzarán entregar el contenedor vacío en el turno de la tarde	30

15	Cantidad de contenedores vacíos pendientes de ser entregados correspondientes al turno de la tarde.	22
16	Cantidad de operadores que debo subcontratar el día siguiente para entregar los contenedores vacíos que tengo pendientes del turno de la tarde del día anterior, considerando que un operador sub contratado puede entregar hasta 2 vacíos por turno en este caso estos vacíos se entregarían durante la mañana.	11
17	De los 22 contenedores vacíos que debo entregar al día siguiente en demora cuántos pueden originar penalidad.	9
Fase II - 1	Demanda del día 2 - turno de la mañana	52
2	Cuántos arrastres tengo disponibles de la tarde del día 1 para cubrir los 52 viajes del turno de la mañana del día 2	44
3	Cantidad de arrastres que se requieren para cubrir la demanda de la mañana del día 2	8
4	Para obtener los 8 arrastres disponibles se hará bajar esos contenedores al piso del patio logístico mediante el	8

	uso de montacargas, es decir cantidad de vacíos hacer bajados.	
5	Total de contenedores vacíos pendientes de entregarse en el turno de la mañana del día 2	14
6	Y se repite el proceso desde las distintas fases detalladas, sucesivamente.	-
1	MODELO B: Número de montacargas a utilizarse en el turno respectivo para la bajada al piso de los contenedores vacíos en el patio logístico.	Mañana: 6 Tarde: 4

Tabla 3.11: Informe de los resultados obtenidos.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la **Error! Reference source not found.** se presentan los nueve escenarios posibles que permitirán visualizar los distintos rubros que participan en la operación según el escenario utilizado, en cada escenario se determina el margen operativo, resultado final que facilitará la toma de decisión al momento de retornar un contenedor vacío. Los escenarios expresados son los siguientes:

Escenario A: Viaje normal o completo, es aquel donde la unidad de transporte realiza toda la operación hasta el retorno del contenedor vacío al patio de la naviera, este escenario corresponde al actual utilizado en la compañía de transporte.

Escenario B: Sub contratación del operador con arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona norte.

Escenario B1: Sub contratación del operador con arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona sur.

Escenario C: Sub contratación del operador sin arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona norte.

Escenario C1: Sub contratación del operador sin arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona sur.

Escenario B2: Sub contratación del operador con arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona norte al siguiente día, asumiendo la penalidad por demora en el retorno al patio de la naviera, más la contratación del montacargas para realizar la maniobra de cargue del contenedor vacío.

Escenario B3: Sub contratación del operador con arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona sur al siguiente día, asumiendo la penalidad por demora en el retorno al patio de la naviera, más la contratación del montacargas para realizar la maniobra de cargue del contenedor vacío.

Escenario C2: Sub contratación del operador sin arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona norte al siguiente día, asumiendo la penalidad por demora en el retorno al patio de la naviera.

Escenario C3: Sub contratación del operador sin arrastre para realizar los retornos de los contenedores vacíos en la zona sur al siguiente día, asumiendo la penalidad por demora en el retorno al patio de la naviera.

RUBROS	ESCENARIOS PARA LA TOMA DE DECISIONES								
	Viaje Completo	Sub contrato - N	Sub contrato - S	Sub contrato - N	Sub contrato - S	Sub contrato - N	Sub contrato - S	Sub contrato - N	Sub contrato - S
		con arrastre	con arrastre	sin arrastre	sin arrastre	con arrastre + D	con arrastre + D	sin arrastre + D	sin arrastre + D
	Escenario A	Escenario B	Escenario B1	Escenario C	Escenario C1	Escenario B2	Escenario B3	Escenario C2	Escenario C3
Venta (valor del viaje)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Costo del viaje	160	125	125	125	125	125	125	125	125
Costo / entrega del contenedor vacío al patio de la naviera ruta norte con operador sub contratado	N/A	40	N/A	35	N/A	40	N/A	35	N/A
Costo / entrega del contenedor vacío al patio de la naviera ruta sur con operador sub contratado	N/A	N/A	35	N/A	30	N/A	35	N/A	30
Alquiler de montacargas por hora	N/A	20	20	N/A	N/A	20	20	N/A	N/A
Demora - penalidad diaria	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	40	40	40	40
Total de costos operativos	160	185	180	160	155	225	220	200	195
Margen Operativo	90	65	70	90	95	25	30	50	55
% Margen Operativo	36%	26%	28%	36%	38%	10%	12%	20%	22%

Tabla 3.12: Escenarios para la toma de decisiones.
Fuente: Elaboración propia.

3.8. COMPARACIÓN CON LA SITUACIÓN ACTUAL

En esta sección hacemos una comparación entre la estrategia actual con la cual la empresa realiza la operación del transporte de los contenedores vacíos frente a la operación de transporte que propone el modelo de optimización desarrollado en este estudio.

Actualmente la compañía maneja el esquema de retirar los contenedores de importaciones del puerto, trasladarlos a la bodega del cliente para ser descargados y luego retornar el contenedor vacío al patio de la naviera; sin embargo, la empresa tiene como objetivo cumplir todos los requerimientos diarios de despachos solicitados por los clientes, es decir cubrir toda la demanda, para ello incurre en costos operativos considerados de manera empírica debido a que la compañía no cuenta con un estudio de la situación que permita determinar cuál es la política de transporte que satisfaga al cliente e incremente la venta al menor costo posible.

En este estudio se ha demostrado que la compañía genera un margen rentable con su operación actual del 36% como lo detalla en la

Tabla 3.13: Situación actual con los mejores escenarios posibles., con un bajo nivel de servicio debido a los incumplimientos de despachos a los clientes y con costos de operación elevados, sin embargo con la modelización del problema determinamos que si se considerarán ciertos escenarios para cumplir la demanda, podemos mantener y hasta incrementar el margen operativo del 36% al 38%, elevando el nivel de servicio al cumplir la totalidad de la demanda diaria, satisfaciendo al cliente, manteniendo los costos operativos e incluso disminuyéndolos hasta un 5%. En la

Tabla 3.13: Situación actual con los mejores escenarios posibles., se reporta un resumen anual de los mejores escenarios frente al actual en lo cual se demuestra la ventaja de la utilización del modelo matemático de optimización desarrollado en este estudio.

RUBROS	ESCENARIOS PARA LA TOMA DE DECISIONES		
	Viaje Normal	Sub contrato – N sin arrastre	Sub contrato – S sin arrastre
	Escenario A	Escenario C	Escenario C1
Venta (valor del viaje)	\$ 6.864.000,00	\$ 6.864.000,00	\$ 6.864.000,00
Costo del viaje	\$ 4.392.960,00	\$ 3.432.000,00	\$ 3.432.000,00
Costo / entrega del contenedor vacío al patio de la naviera ruta norte con operador sub contratado	N/A	\$ 960.960,00	N/A
Costo / entrega del contenedor vacío al patio de la naviera ruta sur con operador sub contratado	N/A	N/A	\$ 823.680,00
Alquiler de montacargas por hora	N/A	N/A	N/A
Demora - penalidad diaria	N/A	N/A	N/A
Total de costos operativos	\$ 4.392.960,00	\$ 4.392.960,00	\$ 4.255.680,00
Margen Operativo	\$ 2.471.040,00	\$ 2.471.040,00	\$ 2.608.320,00
% Margen Operativo	36%	36%	38%

Tabla 3.13: Situación actual con los mejores escenarios posibles.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra en la

Figura 3.5: Comparación con la situación actual el comparativo con respecto a la demanda de operaciones que se cubrió en el último año 2015 junto con las ventas logradas en el respectivo período, versus los resultados del escenario mejor posible que la compañía deberá considerar en el año presente para la optimización de sus recursos y el incremento de las ventas.

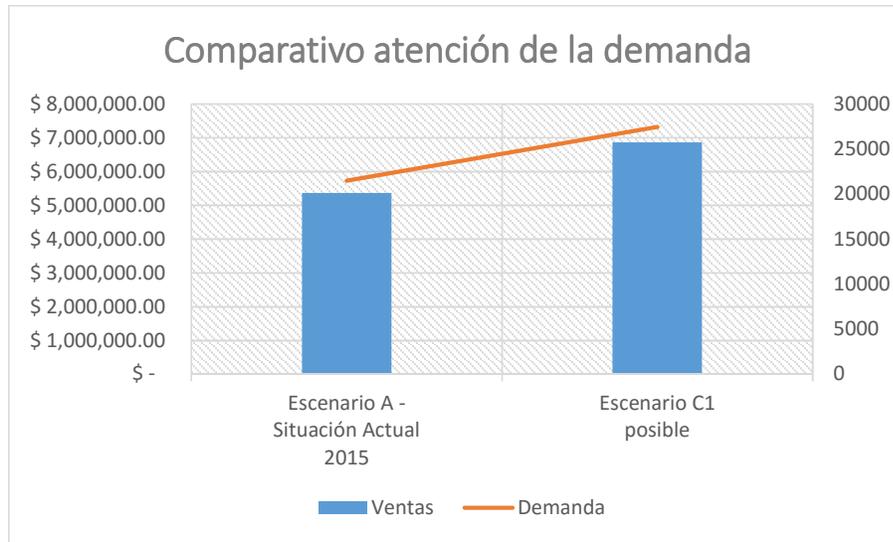


Figura 3.5: Comparación con la situación actual

Fuente: elaboración propia

En la siguiente Figura 3.6: Comparación atención de la demanda, mostramos la comparación de la situación actual versus los escenarios mejores posibles obtenidos con el diseño de un modelo de optimización matemático, los cuales permitirán tomar la mejor decisión que beneficie a la organización en rentabilidad.

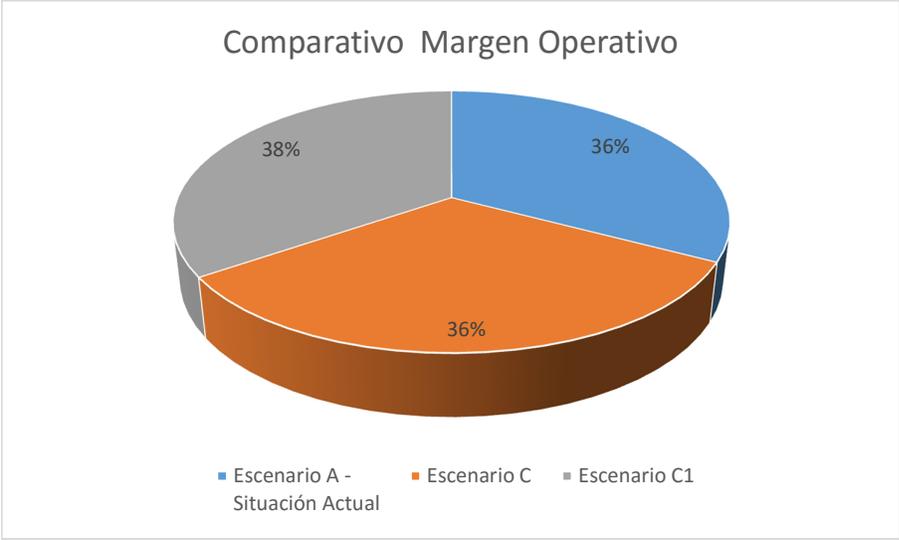


Figura 3.6: Comparación atención de la demanda

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Después de realizar el análisis de los procesos operativos de la empresa de transporte correspondiente al retorno de los contenedores vacíos, de haber establecido los distintos escenarios que permitan brindar una alternativa de cómo operar, y finalmente, de haber diseñado un modelo que permita tomar la mejor decisión posible hemos concluido lo siguiente:

El enfoque de este problema por medio de un esquema matemático de optimización es adecuado, pues permitirá mejorar significativamente la operación actual de transporte de los contenedores vacíos.

El trabajar con este tipo de esquema que ayuda a establecer cuál es la decisión más conveniente para la empresa, debido a que conoce sus límites de recursos y de cumplimiento en atención a los despachos o demanda, esto les facilitará las decisiones de inversiones para aumentar su capacidad productiva, a través de la adquisición de nuevos activos fijos o el incremento de sub contratación de operadores, motivando la competitividad en el mercado y aumentando las ventas.

Actualmente no se está considerando los lead times de los distintos sub procesos operativos que involucra el retorno de los contenedores vacíos, por lo cual una vez implementados en el modelo se ajustará más a la realidad el problema permitiendo obtener una alternativa de decisión más óptima y más ajustable a la realidad de la operación.

A pesar de la diferencia entre el margen rentable del escenario actual que lleva a cabo la compañía, el cual representa el 36% versus los márgenes que se obtendrían con los nuevos escenarios, no representan una mayor discrepancia entre ambos, ya que los nuevos márgenes se encuentran en el rango del 36% al 38%, mientras que sus costos operativos se mantienen en unos escenarios y en otros generan una reducción de 5 puntos; estos

escenarios permiten visualizar y a su vez definir un plan que permitirá abastecer toda la demanda diaria, logrando la satisfacción de los clientes y a su vez, la perpetuidad del negocio con intereses en futuros proyectos de crecimiento continuo y a escala con nuestros clientes, por otro lado permitirá aumentar en 2 puntos el margen para ciertas operaciones que sean solo de la zona sur, y sobretodo permitirá hacer más productiva la flota de vehículos.

Los escenarios son todos positivos con respecto al margen operativo, sin embargo hay dos escenarios que el modelo no recomienda por su bajo rendimiento.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se solicita siempre mantener actualizada la base de datos utilizada en el modelo junto con un constante monitoreo, sobre todo los datos de la demanda debido a que la misma puede adquirir diferentes comportamientos de acuerdo al mercado.
- Considerar nuevas variables, índices y restricciones en la modelización del problema tales como: el índice de tiempo que se incurre en los retornos de los vacíos por zona, y horarios de recepción de los clientes.
- Actualizar el modelo con la información de los turnos asignados por los módulos portuarios cuando no cumplan con el horario fijado por la compañía.
- Se recomienda considerar en este proyecto el impacto ambiental tanto en la actualidad como en el futuro, la emisión de CO₂ y obtenciones de licencias ambientales según la ley, todos estos factores involucran cambios en procesos operativos.

- Implementar un procedimiento para el control del retorno de los vacíos y a su vez la satisfacción al cliente, con respecto al cumplimiento de sus requerimientos se sugiere utilizar indicadores para estas mediciones.
- Finalmente se recomienda de manera mensual mostrar los resultados obtenidos con la ejecución de los mejores escenarios, a fin de realizar una comparación con la situación actual, tal como se mencionó en el desarrollo de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Ramos, P. Sánchez, J. Ferrer, J. Barquín y P. Linares, «Modelos Matemáticos de Optimización - GAMS,» Septiembre 2010. [En línea]. Available: www.doi.icaei.upcomillas.es.
- [2] F. Sandoya, *Lenguaje de la programación Lineal*, Guayaquil, 2012.
- [3] E. Baquela y A. Rechuck, *Optimización Matemática con R. Volumen I: Introducción al modelado y resolución de problemas*, Madrid: Bubok Publishing S.L., 2013.
- [4] A. J. C. P. P. R. G. y. N. A. Enrique Castillo, *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*, 2002.
- [5] H. A. Taha, *Investigación de Operaciones 7a. edición*, México: Pearson Educación, 2004.
- [6] R. Castro y A. Rojas, «Método Simplex,» México .
- [7] R. Martí Cunquero, *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria*, Valencia.
- [8] I. Lakatos, *La metodología de los Programas de investigación científica.*, Madrid: Alianza, 1993.
- [9] E. Alba, M. Laguna y R. Martí, *Métodos Evolutivos*.
- [10] E. Mensura, O. Cetina y B. Hernández, *Nuevas Heurísticas Inspiradas en la Naturaleza para Optimización Numérica*, México .
- [11] J. A. M. Pérez, «Metaheurísticas: Concepto y Propiedades,» 2004. [En línea]. Available: <http://webpages.ull.es/users/jamoreno/>.
- [12] Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ramificaci%C3%B3n_y_poda.
- [13] F. Sandoya, *Programación Matemática Parte I*, 2012.
- [14] V. Begoña, «Modelos Operativos de Gestión,» Madrid, 2009.
- [15] S. A. Ramos, *Modelos y Optimización I*, 2007.
- [16] E. Alba, M. Laguna y R. Martí, *Métodos Evolutivos*.

ANEXO 1

```
Option Optcr=0;

** El caso A siempre sera el mejor, en comparacion al caso B

Set
k Cabezal /1*52/
a Arrastres /1*66/
t Turno /Manana,Tarde/ ;

Scalar TotalArrastres /66/
Scalar CostoMontacargaHora /20/
Scalar CostoPenalidad /50/
Scalar CostoRutaNorte /40/
Scalar CostoRutaSur /35/
Scalar CostoSubcontratar /125/
Scalar CostoNoSubcontratar /160/

Parameter Ruta(k,t);
Ruta(k,t)=Uniformint(0,1);
*1 si es ruta Norte, 0 si es ruta Sur

Parameter Pendientes(k,t);
Pendientes(k,t)=Uniformint(0,1);

Parameter Penalidad(k,t);
Penalidad(k,t)=Uniformint(0,1);

Parameter Demanda(k,t);
Demanda(k,t)=1;

Variable
Z costo total
Integer variable
Descargar(t) Numero total de vacios a descargar en el turno t
Total Total de Pedidos Pendientes
Demoraje(k,t) Si existio demoraje en un turno t para algun vehiculo
Montacargas(t) Numero de Montacargas a usar para bajar los vacios al piso

Binary variable
Carga(k,a,t) Carga que nace del arrastre a asignado al vehiculo k en el turno t
Subcontratados(k,t) Si el viaje k-t fue subcontratado
NoSubcontratados(k,t) Si el viaje k-t no fue subcontratado
Desenganchados(a,k) Si el arrastre a esta desenganchado

Equations
Costo Funcion Objetivo

Cabezal_arrastre Combinacion de los cabezales k con un arrastre a para cumplir un envio
Maximo_de_arrastres_primer_envio Maximo de arrastres que posee la compania
Maximo_de_arrastres_segundo_envio Maximo de arrastres que posee la compania para el segundo turno
Arrastres_por_turno Asignar a cada arrastre un solo vehiculo en cada turno
Maximo_arrastre_por_vehiculo Asignar hasta maximo un arrastre por vehiculo en un turno
Arrastres_disponibles_para_segundo_turno Arrastres que no tienen un vacio encima para ser usado po
Consistencia_entre_restantes_pendientes Asignar como restantes a un arrastres que no fue usado en
Arrastres_Descargados Arrastres que sus vacios fueron descargados para ser usados en un segundo vi
Envios_subcontratados Envio en el cual no se entrego el vacio a la naviera y se procedio a realiza
Envios_subcontratados2 Envio en el cual se lo asigna como demoraje al pendiente de la tarde
Envios_subcontratados3 Asignar como subcontratado a un vacio que fue desenganchado
```

Envios_no_subcontratados Envío en el cual no se realizó la subcontratación y el cabezal k regreso el vacío con el arrastre al patio
 Arrastres_no_disponibles_para_un_segundo_viaje Si el arrastre esta desenganchado para que un tercero envíe el vacío
 TT Total de pendientes
 Mont Numero de montacargas a usar para bajar los vacíos que no se entregaran por la compañía y se entregarían otro día o por un te
 ;

Costo.. $Z=e=Sum[(k,t), Demoraje(k,t)*Penalidad(k,t)*CostoPenalidad]+Sum[(k,t), Subcontratados(k,t)*(CostoSubcontratar+(Ruta(k,t)*Costo$

*** Aquí se generan los viajes*

Cabezal_arrastre(k,t).. Demanda(k,t)=e=Sum[a,Carga(k,a,t)];

*** Aquí se asignan los arrastres*

Maximo_de_arrastres_primer_envio.. Sum[(k,a),Carga(k,a,'Manana')]=l=TotalArrastres;

Maximo_de_arrastres_segundo_envio.. Sum[(a,k),Carga(k,a,'Tarde')]=l=TotalArrastres-Sum[(a,k),Desenganchados(a,k)];

Arrastres_por_turno(a,t).. Sum[k,Carga(k,a,t)]=l=1;

Maximo_arrastre_por_vehiculo(k,t).. Sum[a,Carga(k,a,t)]=l=1;

Arrastres_disponibles_para_segundo_turno.. TotalArrastres-Sum[(a,k),Carga(k,a,'Manana')]=g=Sum[(a,k),Desenganchados(a,k)];

Consistencia_entre_restantes_pendientes(a,k).. Desenganchados(a,k)=l=Carga(k,a,'Manana')*Pendientes(k,'Manana');

*** Aquí se genera la subcontratación para el primer turno*

Arrastres_Descargados(t).. Descargar(t)=e=Sum[k,Pendientes(k,t)]-Sum[k,Subcontratados(k,t)];

Envios_subcontratados(k,t).. Subcontratados(k,t)+Demoraje(k,t)=e=Pendientes(k,t);

Envios_Subcontratados2(k).. Demoraje(k,'Tarde')=e=Pendientes(k,'Tarde');

Envios_subcontratados3(k).. Subcontratados(k,'Manana')=e=Sum[a,Desenganchados(a,k)];

Envios_no_subcontratados(k,t).. 1-Subcontratados(k,t)=e=NoSubcontratados(k,t);

Arrastres_no_disponibles_para_un_segundo_viaje(a,k).. 1-Desenganchados(a,k)=g=Carga(k,a,'Tarde');

***Datos extras*

TT(t).. Total(t)=e=Sum[k,Pendientes(k,t)];

***Montacargas*

Mont(t).. Montacargas(t)=g=Descargar(t)*(10/60);

Model

Proyecto /all/

Solve

Proyecto using mip min Z

Display

Z.1, Demanda, Ruta, NoSubcontratados.1, Subcontratados.1, Carga.1, Pendientes, Desenganchados.1, Total.1, Descargar.1, Demoraje.1, Penalidad, M