

Plan to Program Distribution Routes of Perishables Headed to Retail Outlets

Juan Carlos Chia de la Flor, Ingeniero¹, María Belén Segovia Navarrete, Ingeniera²

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, jcchia@espol.edu.ec

²Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, mabesejo@espol.edu.ec

Abstract- *This project was developed in an important company that distributes perishable products of massive consumption, from the city of Guayaquil to 173 establishments nationwide. The main objective was to reduce the distribution costs for critical routes through the implementation of a logistics tool to create efficient distribution routes. The routing problem was identified as a Vehicle Routing Problem with Mix Fleet and Time Windows. This paper proposes a heuristic method to find a solution by combining the heuristic variations for the Vehicle Routing Problem with Time Windows, and the heuristic developed for the Vehicle Routing Problem with Mix Fleet. After stating three simulation scenarios and comparing with the current situation of the company, it is shown that the heuristic significantly reduces logistics costs inherent to the distribution of products.*

Key Words: *Perishable Products, Distribution Routes, Simulation, Heuristic Models, Programming of Routes, Cold Chain.*

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.197>

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-6390

Plan de programación de rutas para productos perecibles en cadena de retail

Juan Carlos Chia de la Flor, Ingeniero¹, María Belén Segovia Navarrete, Ingeniera²

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, jcchia@espol.edu.ec

²Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, mabeseago@espol.edu.ec

Abstract– *This project was developed in an important company that distributes perishable products of massive consumption, from the city of Guayaquil to 173 establishments nationwide. The main objective was to reduce the distribution costs for critical routes through the implementation of a logistics tool to create efficient distribution routes. The routing problem was identified as a Vehicle Routing Problem with Mix Fleet and Time Windows. This paper proposes a heuristic method to find a solution by combining the heuristic variations for the Vehicle Routing Problem with Time Windows, and the heuristic developed for the Vehicle Routing Problem with Mix Fleet. After stating three simulation scenarios and comparing with the current situation of the company, it is shown that the heuristic significantly reduces logistics costs inherent to the distribution of products.*

Keywords– *perishable products, distribution routes, simulation, heuristic models, programming of routes, cold chain.*

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Distribución de Frío (CDF) de la empresa en cuestión. Desde el CDF se distribuye todos los productos perecibles a los 173 locales que posee en el país.

Para esto, fue necesario recopilar la información, restricciones y parámetros requeridos para la construcción de un modelo heurístico y la ejecución de simulaciones.

Se utilizaron métodos heurísticos para la programación de rutas de distribución, y se partió de los siguientes supuestos: ventanas horarias rígidas, distinta capacidad en cada tipo de vehículo y flota de vehículos ilimitada. Además, se planteó 3 escenarios para ventanas horarias en las simulaciones.

Finalmente, con los registros históricos de costos de distribución de la empresa se contrastó los resultados obtenidos en la simulación versus los costos reales. Esto permitió determinar los ahorros obtenidos (5%) y evidenciar el cumplimiento del objetivo de reducción de costos, especialmente en el segundo escenario escogido, ventanas horarias flexibilizadas.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A. Antecedentes

La empresa del caso de estudio fue fundada en 1960 en la ciudad de Guayaquil, Ecuador.

La actividad principal de la empresa bajo estudio es la venta de productos de consumo masivo, orientados al uso personal, a través de una amplia red de locales distribuidos a nivel nacional. Actualmente la empresa se encuentra en un

proceso de expansión y son más de 120,000 los clientes que diariamente visitan sus locales a nivel nacional.

La empresa cuenta con 173 locales distribuidos en 80 ciudades y 21 provincias. Dispone también de un Centro Nacional de Distribución (CND), y un Centro de Distribución de Frío (CDF) ubicados en la ciudad de Guayaquil, además de un Centro Regional de Distribución (CRD) ubicado en Quito.

Desde el CDF se distribuye todos los productos perecibles a los 173 locales que posee en el país. Este rubro representa para la empresa en promedio el 30% de sus ingresos anuales, por lo tanto, se plantea disminución de costos a través de una efectiva distribución.

B. Problemática

Al tratarse de una empresa cuya actividad económica es la distribución y venta de productos de consumo humano, su mayor problemática se encuentra en los costos asociados al transporte y distribución de los productos perecibles. El costo de distribución de productos perecibles representa aproximadamente el 2.30% de las ventas netas anuales en comparación con el 1.19% que representa este costo para los productos secos. Una de las causas con mayor impacto en las operaciones de distribución de productos es la Programación de las Rutas de Distribución.

1) Objetivo General

Diseñar una herramienta que permita la programación de rutas para productos perecibles en cadena de retail con el fin de disminuir los costos de la distribución de sus rutas críticas.

2) Objetivos Específicos

- Levantar información correspondiente a las frecuencias, tiempos de ruta, ventanas horarias y volumen de despacho de operación actual, para contar con la información necesaria para construir un modelo matemático.
- Generar rutas eficientes de acuerdo a volúmenes de carga y capacidad de camiones, para cumplir con la ventana horaria de los locales y asegurar la disponibilidad del producto, a un menor costo.
- Desarrollar una herramienta que permita lograr una mayor eficiencia y eficacia en la operación de transporte de los productos a los distintos locales del país, obteniendo como resultado una disminución en los costos.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.197>

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-6390

III. MARCO TEÓRICO

A. Características de Problemas de Ruteo

En los problemas de ruteo, el objetivo primordial es la determinación de rutas de distribución con un costo mínimo. Esto se debe hacer considerando la interacción de entidades como: clientes, centros de distribución, y vehículos; los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de un horizonte geográfico. Las diferentes características, consideraciones y restricciones operativas de las entidades dan lugar a variantes en los problemas de ruteo [1].

1) Clientes

Cada cliente posee una demanda que debe ser cubierta por un vehículo. Es usual que cada cliente sea visitado una sola vez y estos pueden tener restricciones de horario de servicio o recepción de mercadería.

2) Centro de distribución

El centro de distribución, almacena los productos que serán distribuidos. En este depósito generalmente los vehículos esperan a ser cargados y despachados.

3) Vehículos

Cada vehículo puede tener características y dimensiones diferentes (peso, volumen, motor). La flota de vehículos se denomina homogénea cuando todos los vehículos poseen estas mismas características sobre todo si se mide capacidad. Si existen diferencias entre ellos, se denominará flota heterogénea.

B. Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)

El Problema de Ruteo de Vehículos (o VRP por Vehicle Routing Problem) es la planificación de ruteo de vehículos que tiene por objetivo minimizar los costos de cubrir rutas asociadas a locales con una necesidad de demanda, utilizando vehículos con igual capacidad de carga y con la condición de que los vehículos que parten de un depósito, deben regresar a él [1].

1) Variantes del VRP

a) Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW)

El Problema de Ruteo de Vehículos con Ventana de Tiempo (o VRPTW por Vehicle Routing Problem with Time Windows) es una de las variantes más importantes es incluir al VRP la restricción de ventanas de tiempo asociada a cada cliente.

b) Problema de Ruteo de Vehículos con Flota Heterogénea (FSMVRP)

El Problema de Ruteo de Vehículos con Flota Heterogénea (o FSMVRP por Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem) Otra variante del VRP es el de flota heterogénea donde la capacidad y costos de cada tipo de vehículo difiere, no solo se debe decidir la ruta sino de la forma que se compone la flota.

c) Problema de Ruteo de Vehículos con Flota Heterogénea y Ventanas Horarias (FSMVRPTW)

Esta variante es la combinación de las dos mencionadas anteriormente, donde cada cliente tiene asignado un límite de tiempo y además tiene un conjunto de vehículos que varía en sus características. Este modelo asigna los vehículos a las rutas según su capacidad y hora de llegada y servicio factibles. Este problema es el que más se asemeja a la realidad de las operaciones de distribución de las empresas.

C. Heurísticas

Son métodos poco complejos, no aseguran encontrar la solución óptima pero sí una muy cercana a través de una exploración del espacio solución. Las soluciones resultantes son aceptables y tienen una complejidad algorítmica baja, que pueden ser mejoradas a través de otros métodos pero a mayor costo computacional.

D. Heurísticas clásicas para el VRP

1) Algoritmo de Ahorros

Uno de los algoritmos de mayor utilización para problemas de ruteo, es el Algoritmo de Ahorros, desarrollado por Clarke y Wright. Este algoritmo indica que si se emplean dos rutas diferentes "(0,...,i,0)" y "(0,j,...,0)", pueden combinarse para formar una nueva ruta "(0,...,i,j,...,0)". Esto se muestra en la Fig. 1. El ahorro generado por la unión de las rutas se expresa según(1).

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (1)$$

El mismo que compara el costo que representa cubrir las rutas individuales con el costo de cubrir las rutas combinadas[1].

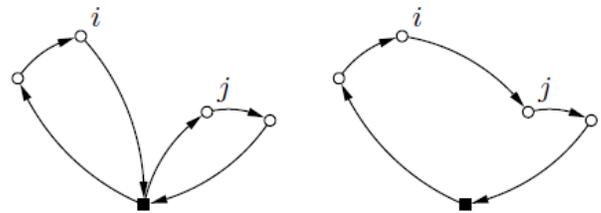


Fig 1. Ejemplo de optimización de rutas

2) Algoritmo de Ahorros de Solomon

Solomon[3] propuso una extensión del Algoritmo del Ahorro antes mencionado, la cual incluye restricciones con ventanas de tiempo.

Determinar si la unión de dos rutas r_i y r_j es factible no resulta directo en presencia de ventanas de tiempo, pues el arribo a los clientes de r_j puede atrasarse y esto podría ocasionar que se violaran algunas ventanas de tiempo.

3) Algoritmo de Ahorros de Golden

En cambio, Golden, Assad, Levy y Gheysens[2] propusieron otra extensión del Algoritmo del Ahorro que incluyen consideraciones de flotas de vehículos con diferentes capacidades. En este algoritmo, cada vehículo con capacidad suficiente y menor costo, se encarga de cubrir la demanda z de un nodo, asignándole una notación de $F(z)$ al costo del vehículo más barato.

Una desventaja de cualquiera de estas propuestas es que incorporan datos de la demanda de las rutas en la definición del ahorro y por lo tanto algunos ahorros deben ser recalculados en cada iteración del algoritmo[1].

En la propuesta de Golden *et al* [2] se reestructura la definición del ahorro originalmente planteada por Clarke & Wright, para poder incluir los costos fijos de los diferentes tipos de vehículos.

IV. METODOLOGÍA

A. Recolección de datos

La empresa, cuenta con registros históricos y estadísticos, políticas y parámetros tanto de las variables como de las restricciones del sistema logístico que manejan. La información requerida para el modelo es la siguiente:

- Capacidad de llenado del camión.
- Demanda de locales.
- Ventanas horarias de cada local.
- Política de asignación de costos.

B. Determinación de rutas críticas

Para la determinación de las rutas críticas se utilizó el Historial de Costos Totales de Distribución por Ruta del CDF el cual incluía información de los últimos 3 meses y una semana (septiembre-diciembre de 2015). Luego se seleccionó el 11% de las rutas con mayores costos de distribución, es decir 7 rutas de 63 existentes. Con los datos históricos de los costos y utilizando una herramienta denominada diagrama de Pareto el cual nos permite apreciar de manera visual, el impacto que tiene el 11% de las rutas, sobre el 44% de los costos totales de distribución.

C. Selección del modelo matemático

Dadas las restricciones y características puntuales que posee la empresa bajo estudio, la determinación del modelo a utilizar requirió de un proceso de investigación exhaustivo para definir las restricciones que reflejen la situación actual del caso de estudio.

D. Desarrollo de la heurística

Las variantes en el modelo de ahorros se denominan “Algoritmo de Ahorros de Golden FSMVRP” para restricciones con capacidades de camiones y “Algoritmo de Ahorros VRPTW” para restricciones de ventanas horarias, las cuales se permite combinar para crear una nueva heurística.

E. Planteamiento de escenarios para la simulación

Una vez construido el modelo con sus restricciones y características y una vez determinado el período de estudio, se pudo observar que una de las restricciones que mayor impacto en los resultados tiene son las ventanas horarias, en donde, ligeros cambios o modificaciones en las mismas pueden representar ahorros aún mayores, por tal motivo se procedió a plantear diferentes escenarios en los cuales se considera realizar modificaciones a las ventanas horarias, para posteriormente comparar los resultados obtenidos y seleccionar el escenario más adecuado.

V. ANÁLISIS DE DATOS

A. Capacidad de llenado de camión

Los vehículos son entidades con capacidad finita, en el CDF, la flota de vehículos que se emplea es heterogénea, esto quiere decir que sus características, potencia de motor y dimensiones de furgón son variables. Una característica indispensable en la flota es contar con un equipo de refrigeración industrial en cada furgón de carga.

Existen 4 tipos de vehículos: Liviano, pequeño, mediano y grande.

Se cuenta con un registro de las dimensiones de los furgones de carga de cada camión afiliado a las distintas cooperativas de transporte de carga pesada con las que la empresa trabaja. Utilizando este registro es posible calcular la capacidad volumétrica de cada furgón.

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{VolumenFurgon}}{\text{VolumenGaveta}} \quad (2)$$

Utilizando (2) se determinó las capacidades de cada tipo de furgón en función del número de gavetas (ver Tabla 1).

TABLA I
CAPACIDAD DE VEHÍCULOS EN GAVETAS

Liviano	Pequeño	Mediano	Grande
200	305	447	560

B. Demanda de locales

El volumen a ser despachado desde el CDF, corresponde a la demanda de productos por cada local. Por tal motivo, una de sus características es que varía diariamente y tiene un comportamiento cíclico moderado. Posee solamente un pico fuerte al año que corresponde al mes de diciembre.

Se observó que existen movimientos periódicos que se producen en forma recurrente de forma semanal. Estos indican que existe estacionalidad en los despachos. Adicionalmente se pudo evidenciar que los despachos realizados en un periodo de tiempo de 10 meses siguen una tendencia creciente lo cual se relaciona con el crecimiento de ventas que la empresa mantiene en la actualidad.

C. Ventanas Horarias

Las ventanas horarias se rigen en base a ordenanzas municipales o a políticas de operación de los locales. La mayoría de las ventanas horarias obedece ordenanzas municipales mientras que otros locales poseen políticas de operaciones que prohíben realizar recepción de productos por las tardes.

TABLA II
VENTANAS HORARIAS

N° Local	Sucursal	Ciudad	Restricción	Inicio de Ventana Horaria	Cierre de Ventana Horaria
379	Yantzaza	Yantzaza		6:00 AM	12:00 PM
364	Plaza del Valle (Loja III)	Loja		6:00 AM	12:00 PM
362	Catamayo	Catamayo	Restricción municipal de descarga, no camiones mayores a 10 toneladas	8:00 PM	9:00 PM

D. Política de Asignación de Costos

El CDF posee una política de asignación de costos, la cual establece el costo de una ruta previamente planificada(3).

$$\text{Costo de Ruta} = \text{Tarifa local más distante} + \text{Total adicionales} + \text{Tarifa día siguiente} \quad (3)$$

Dónde:

- Tarifa local más distante.- Costo de traslado hasta local (existen tarifas fijas para cada uno de los locales).
- Total Adicionales.- Existe una política que establece que por cada local visitado se pagará un valor adicional dependiendo del tipo de vehículo; de la siguiente manera:
 - Livianos: \$8
 - Pequeños: \$10
 - Medianos: \$12
 - Grandes: \$15
- Tarifa día siguiente.- Compensación que se paga a los transportistas para que cubran alimentación en viajes que debido a su extensión arriban al siguiente día.

El costo de cada ruta se descompone en costos fijos y costos variables.

Los costos fijos en esta fórmula(3) corresponden a la tarifa por local más distante y tarifa día siguiente (si aplica). Los costos variables corresponden a la tarifa Total adicionales, los cuales añaden un valor por cada n locales que se visiten.

E. Cadena de frío

Se realizó un análisis de las variaciones de temperatura a lo largo de la duración de los distintos recorridos realizados por los vehículos. Con el fin de determinar el comportamiento de las temperaturas a lo largo de las rutas de distribución.

Las temperaturas a lo largo del tiempo no se mantienen constantes. Se puede apreciar también que el decrecimiento de la temperatura a lo largo del tiempo no es lineal, sino más bien cíclico. Esto se debe a los ciclos de enfriamiento de los equipos

de refrigeración. Cada ciclo tiene una duración de 1 hora con 12 minutos en su etapa estable y puede variar aproximadamente 2.5°C. Durante esta etapa se alcanza una tendencia decreciente en las temperaturas. Si se sigue los parámetros establecidos para la temperatura de salida de un vehículo desde el CDF (8-12°C), el tiempo hasta alcanzar los 6°C en promedio que se deben mantener para hacer prevalecer la cadena de frío, es de 3 horas y 45 minutos.

Para encontrar un patrón de comportamiento de las temperaturas en los ciclos de enfriamiento de la cadena de frío, se tomó en consideración los tiempos de transporte para los distintos locales que integran las rutas de distribución de la empresa. Para facilidades de estudio se realizó segmentaciones en las distancias de tiempo entre locales (ver Tabla 3).

TABLA III
SEGMENTACIÓN DE TIEMPO ENTRE LOCALES

Tiempos de transporte
De 0 a 20 Minutos
De 20 a 200 Minutos
De 200 a 500 Minutos
De 500 a 1100 Minutos

Los tiempos de mayor magnitud, es decir de 200 a 1100 minutos de recorrido, corresponden en su mayoría a los tiempos de transporte entre el CDF y el primer local que conforme una ruta de las rutas más distantes, mientras que los segmentos de tiempo de 0 a 200 minutos corresponden los tiempos de transporte entre locales cercanos o entre el CDF y locales cercanos.

Utilizando un registro histórico de tiempos y temperaturas generado por termógrafos instalados en cada vehículo, se logró calcular las tasas de variación de temperatura para cada segmento del trayecto entre locales. Se tomó como referencia las duraciones de todas las trayectorias realizadas por vehículos para la distribución de productos en un periodo de 5 días, y se clasificó según los segmentos propuestos.

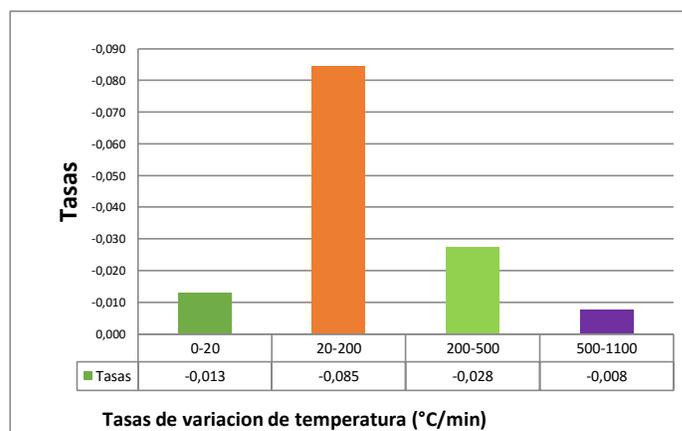


Fig. 2 Gráfica de variación de temperaturas por segmentos de tiempo.

F. Rutas críticas

Utilizando el diagrama de Pareto se determinó que el 11% del total de rutas, es decir 7 rutas de 63, se consideran rutas críticas, debido a que sus costos de distribución representan el 44% de los costos totales de distribución. Las rutas críticas incluyen 39 locales en diferentes provincias a nivel nacional, todas localizadas a distancias mayores de 480 Km del CDF.

VI. PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

A. Formulación de modelo matemático

Conjuntos

$V = \{1, \dots, n\}$ conjunto de clientes y depósito

$K = \{1, \dots, m\}$ conjunto de tipos de vehículos

Parámetros

c_{ijk} = costo de transporte de i a j en vehículo k .

t_{ij} = tiempo de viaje desde i a j .

s_i = tiempo de servicio i .

$[a_i, b_i]$ ventana de tiempo asociada a cada local i .

d_i = demanda del local i .

f_k = costo fijo del vehículo k .

q_k = capacidad del vehículo k .

Variables

$x_{ijk} : \begin{cases} 1, & \text{si el vehículo } k \in K \text{ atraviesa el arco } (i, j) \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$

y_{ik} : hora de arribo al cliente i en vehículo k

$$\text{Min} \sum_{k \in K} f^k \sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0jk} + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (4)$$

La función objetivo (4) es el total de los costos fijos por utilización de vehículos y el costo de las rutas.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\} \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} - \sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in V \setminus \{0, n+1\} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0, n+1\}} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq q_k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

La restricción (5) permite que todos los clientes sean visitados, las restricciones (6) y (7) determinan que cada vehículo recorre una sola ruta de 0 a $n+1$. La restricción (8) limita la ruta según la capacidad del vehículo k .

$$y_{jk} - y_{ik} \geq s_i + t_{ijk} - M(1 - x_{ijk}), \quad (9) \\ \forall i, j \in V \setminus \{0, n+1\}, \forall k \in K$$

La restricción (9) asegura que el vehículo k la hora de llegada al cliente j sea después de la hora que visitó al cliente i , más el tiempo de servicio y el tiempo de traslado a j .

$$a_i \leq y_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\}, \forall k \in K \quad (10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in E, k \in K \quad (11)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\}, \forall k \in K \quad (12)$$

Finalmente en la restricción (10) se imponen los límites de ventanas de tiempo.

B. Desarrollo de la heurística

Inicialización: Para cada cliente i construir la ruta $(0, i, 0)$

Cálculo de ahorros: En cada iteración se tiene un conjunto de rutas, cada una de las cuales cubre cierta demanda z (el total de las demandas de los locales pertenecientes a una ruta) y está asignada al vehículo capaz de cargar dicha demanda que tenga el menor costo fijo; se nota con $F(z)$ al costo fijo de este y con $P(z)$ a la capacidad de dicho vehículo.

Si se tiene dos rutas (una con el cliente i al final y otra con el cliente j al comienzo) con demandas z_i y z_j respectivamente y son combinadas, el ahorro en términos de costos fijos es:

$$F(z_i) + F(z_j) - F(z_i + z_j) \quad (13)$$

Se define \bar{s}_{ij} , entonces, como el Ahorro Combinado (CS, por sus siglas en inglés):

$$\bar{s}_{ij} = s_{ij} + F(z_i) + F(z_j) - F(z_i + z_j) \quad (14)$$

Donde s_{ij} es el ahorro definido por Clarke & Wright:

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (15)$$

Es decir, se suma el ahorro en distancias y el ahorro por costos fijos. Este enfoque es una extensión directa del algoritmo original y toma en cuenta solamente el ahorro de una iteración a la siguiente[1]. Adicional a esta extensión, también se proponen dos definiciones de ahorros que incorporan el costo de oportunidad de utilizar un vehículo de mayor capacidad al unir dos rutas.

En este caso de estudio se utilizó la medida llamada Ahorro de Oportunidad Realista (ROS por sus siglas en inglés), surge para incluir el término del ahorro de oportunidad δ sólo cuando la nueva ruta requiere un vehículo de mayor capacidad que los que utilizan las dos rutas por separado, es decir, cuando

$$w = P(z_i, z_j) - P(\max\{z_i, z_j\}) > 0. \quad (16)$$

Además, considera como ahorro de oportunidad, al costo del vehículo más caro que no puede satisfacer la demanda de la

nueva ruta. Siendo $F'(z)$ el costo fijo del vehículo más caro que no puede cargar una demanda de z , se define:

$$s'_{ij} = \bar{s}_{ij} + \delta(\omega)F'(P(z_i + z_j) - z_i - z_j). \quad (17)$$

Si al momento de calcular los ahorros la demanda z resultante de unir dos con demanda z_i y z_j excede la capacidad del vehículo más grande, esta combinación se vuelve infactible y forma parte de los ahorros a no considerar.

Mejor unión: Sea $s_{i^*j^*} = \max s_{ij}$ donde se toma el máximo de los ahorros que no han sido considerados aún. Sean r_i y r_j las rutas que contiene a los clientes i y j respectivamente. Si i^* es el último cliente de r_i y j^* es el primer cliente de r_j .

Dado que se tiene una ruta factible (con el criterio de capacidad de vehículo) (v_0, \dots, v_{m+1}) con $v_0 = v_{m+1} = 0$, donde cada cliente tiene una asociada una ventana de tiempo $[e, l]$ llamamos b_i, w_i al tiempo de arribo y tiempo de espera al nodo $v_i (0 \leq i \leq m + 1)$ respectivamente. El mínimo tiempo de espera en el nodo $v_i (i \neq 0)$ es

$$w_i = \max\{0, e_i - (b_{i-1} + s_{i-1} + t_{i-1,i})\}. \quad (18)$$

Si el tiempo de arribo al nodo v_i se incrementa PF_i , el tiempo de arribo a los nodos siguientes $v_j (con i < j \leq m + 1)$ aumentará en

$$PF_j = \max\{0, PF_{j-1} - w_j\}. \quad (19)$$

El valor PF ó Push Forward mide cuánto se desplaza el tiempo de arribo respecto a su valor original. Para cada cliente se calcula nuevamente el tiempo de arribo, si este excede la ventana de tiempo se considera infactible la ruta, si está dentro de la ventana horaria entonces esta ruta se agrega al conjunto de rutas solución.

Se elimina $s_{i^*j^*}$ del conjunto de ahorros a considerar. Si todavía quedan ahorros para analizar entonces se regresa al paso de Cálculo de ahorros, si no, termina la heurística.

C. Escenario de simulaciones

Para realizar el análisis de resultados, se plantearon tres escenarios distintos para las ventanas horarias, esto debido a que las ventanas horarias tienen un impacto significativo en los costos de las rutas.

Los escenarios planteados fueron los siguientes:

- Ventanas horarias rígidas (Hard Time Windows)

Las ventanas horarias rígidas son aquellas que no permiten extensiones en los horarios de atención de los locales en el caso de demoras por parte de los transportistas, esto no se ajusta a la realidad de las operaciones de la empresa.

- Ventanas horarias flexibles (Soft Time Windows).

Este escenario se crea para corregir el inconveniente generado por las Ventanas Horarias Rígidas,

flexibilizandolas de tal forma que se permitan retrasos por parte de los transportistas de hasta 25 minutos.

- Ventanas horarias inexistentes.

Consiste en la creación de un caso ideal ficticio, el cual considera que no existen restricciones por ventanas horarias en lo absoluto para ningun local. Sirve solamente como una referencia debido a que genera los menores costos posibles.

D. Desarrollo de herramienta

Para cumplir con el objetivo planteado se realizó la programación de este algoritmo en el software Wolfram Mathematica 10, por su facilidad y dinamismo para este tipo de problemas. Además, se diseñó la base de datos para la entrada de las variables que el modelo necesita en formato .xlsx. Este programa podrá ser utilizado en la empresa para la creación de rutas.

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Utilizando las demandas reales del mes de Agosto, se realizó 30 corridas para cada uno de los escenarios, los costos fueron registrados y comparados con los costos reales en los que incurrió la empresa para cubrir dichas rutas.

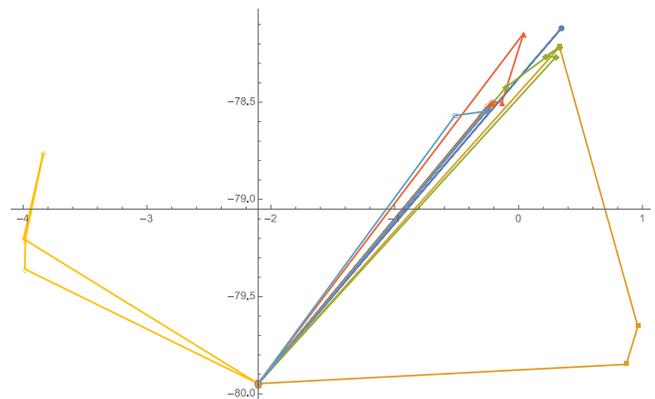


Fig.3 Gráfico de solución final

Los costos de cada escenario y el costo real se detallan en la Fig. 4, y corresponden al mes de agosto.

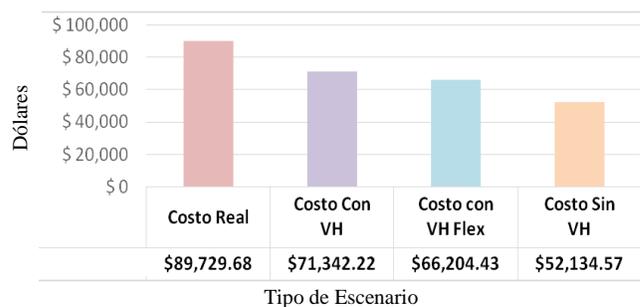


Fig 4. Costo real y costos de cada escenario (largo plazo)

Para determinar los costos y ahorros en el corto plazo fue necesario calcular un coeficiente de ajuste el cual se determina obteniendo el promedio de las diferencias entre los costos reales vs los costos determinados utilizando la política de asignación de costos, para obtener resultados con menor variabilidad se pueden excluir del análisis los costos o datos atípicos.

Dado el dinamismo de la operación los costos reales son un 28,6% mayores a los costos determinados utilizando la política de asignación de costos utilizada por la empresa, esto se debe también a que en las actividades diarias de la empresa surgen costos adicionales los cuales hacen que se presente una mayor variación en los costos. Por tal motivo se procedió a realizar un ajuste, incrementando los costos de simulación en un 28,6%.

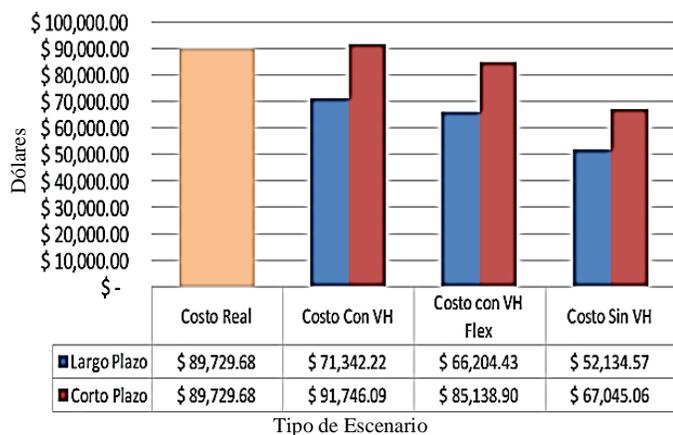


Fig 5. Costo real y costos de cada escenario (corto plazo)

Se pudo observar que los costos sufrieron un ligero aumento, esto se debe al coeficiente de ajuste, el cual hace que los costos se adapten más a la realidad de las operaciones de la empresa.

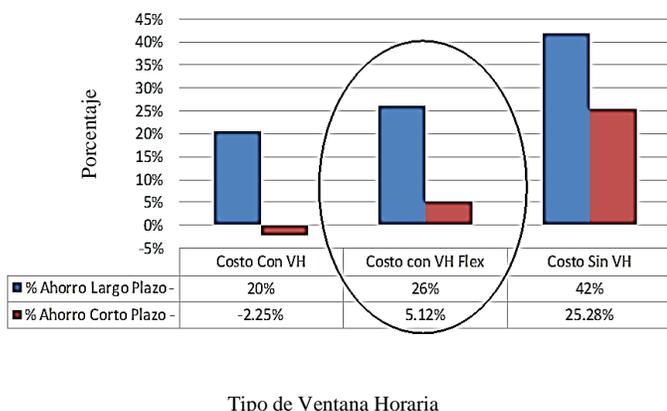


Fig. 6. Ahorro de cada escenario

Se analizó las gráficas con los porcentajes de ahorro tanto de los generados a largo plazo como a corto plazo y se observó que el escenario más factible corresponde al segundo. Este indica que la flexibilización de ventanas horarias tiene un

impacto positivo con respecto a los ahorros generados con un 5.12% de ahorros promedio durante el mes de simulación.

A continuación se detallan los resultados de un día puntual de operaciones, en el cual se despacharon un total de 3440 galletas a 26 locales, cumpliendo la demanda en ambos casos:

# de Rutas	Empresa		Simulación	
	Locales por Ruta	Tipo de vehículo utilizado	Locales por Ruta	Tipo de vehículo utilizado
1	3	Pequeño	1	Liviano
2	9	Pequeño	3	Mediano
3	4	Grande	4	Mediano
4	6	Mediano	3	Mediano
5	1	Mediano	3	Liviano
6	3	Mediano	4	Pequeño
7	-	-	3	Liviano
8	-	-	4	Grande
Costo	\$ 4,269.25		\$ 3,610.71	

Se puede observar que aunque en el resultado de la simulación se obtiene un mayor número de rutas, existe también una variación en los tipos de vehículos utilizados, garantizando así la entrega a tiempo de los productos a cada local.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. Conclusiones

1. Se generó rutas eficientes empleando la herramienta desarrollada, para lo cual se consideró los volúmenes de despacho, restricciones de capacidad de camiones y ventanas horarias de los locales, obteniendo un ahorro del 5%.
2. Mediante un Diagrama de Pareto se determinó que el 11% de las rutas se consideran críticas es decir que representan el 44% de los costos totales de distribución en función a sus distancias desde el Centro de Distribución de Frío.
3. Se determinó que el segundo escenario (ventanas horarias flexibles), que contempla ahorros por 5.12% en el corto plazo, es la mejor solución para el presente caso de estudio, porque incluye todas las restricciones del sistema y se alcanza el objetivo general del proyecto.
4. Con el análisis de la cadena de frío se recomienda que la temperatura máxima de salida de vehículos desde el CDF sea entre 12°C y 9°C para locales distantes (más de 200 min de recorrido), y entre 9°C y 6°C, para locales ubicados a menos de 200 min de recorrido.

B. Recomendaciones

1. Gestionar una mayor flexibilidad en ventanas horarias de locales pertenecientes a rutas críticas. Esto se puede lograr manteniendo conversaciones y negociaciones con los jefes de cada local, hasta llegar a un acuerdo de mutuo beneficio.
2. Crear e implementar un modelo de gestión logístico de tal manera que se permita un fácil acoplamiento de la herramienta propuesta en las actividades de ruteo del CDF. El modelo de gestión logística deberá considerar la determinación de las características más relevantes y de mayor impacto del sistema logístico, implementación de indicadores clave de desempeño para medir dichas características, creación de equipos multidisciplinarios de trabajo, estandarización de procedimientos en áreas clave de la empresa, cambio de cultura organizacional orientada a la aceptación de nuevas tecnologías y mejora continua.
3. Mejorar la solución de las rutas mediante la aplicación de metaheurísticas, que exploran las distintas soluciones en una vecindad y pueden hallar la solución óptima o una muy cercana a ésta.
4. Estandarizar procedimientos para operaciones de distribución de productos perecibles (carga, descarga, asimilación de gavetas, entre otras), con el fin de disminuir la variabilidad de los procesos.
5. Por cada local adicional que se desee visitar dentro de una ruta, se recomienda que la temperatura final del último local visitado sea menor a 15°C y que el siguiente local a visitar se encuentre a por lo menos 20 minutos de recorrido, esto con el fin de disminuir la variación de las temperaturas dentro del furgón de carga.

REFERENCES

- [1] A. Olivera, "Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos" Montevideo, 2004.
- [2] Golden, B., Assad, A., Levy, L., Gheysens, F., "The fleet size and mixvehicle routing problem. Computers & Operations Research 11,"1984.
- [3] Solomon, M.: Algorithms for the vehicle routing and scheduling problemwith time window constraints. Operations Research 35 (1987),pp. 254–264.
- [4] P. Humberto, "Calidad Total y Productividad, C. A. y. Financieras," Ed. Universidad Católica Boliviana, 2013.
- [5] R. H. Ballou, "Logística Administración de la Cadena de Suministro," Pearson, 2004.
- [6] H. N. L., "Logística en la Cadena de Frío", 2013.
- [7] H. Shankar y G. Mani, "GIS bases Solution of Multi-Depot Capacity Vehicule Routing Problem with Time Window Using Tabu Search Algorithm," Dehradm, 2014.