



Diseño de rutas de transporte de personal aplicando modelización matemática para resolver el Problema de Enrutamiento Vehicular Capacitado con Ventanas de Tiempo

Lorena Marina Loor Vélez¹
Patricia Elizabeth Sánchez Villamar²
Víctor Vega Chica³
Instituto de Ciencias Matemáticas
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
lormloor@espol.edu.ec¹
patelsan@espol.edu.ec²
vvega@espol.edu.ec³

Resumen

En el presente artículo implementa un modelo de programación matemática que tiene como objetivo principal el diseño de rutas, la misma que cumplan con las restricciones de ventanas de tiempo, capacidad de los vehículos de una empresa la cual realiza la función de transporte de personal a otras entidades. Está estructurada de la siguiente forma la primera parte contiene una introducción al problema. La segunda sección consiste en un estudio de la situación actual de la empresa, que involucra, paraderos, clientes, vehículos y costos de las rutas definidos por la empresa. En la tercera etapa se analiza el modelo matemático que mejor se ajuste a las condiciones reales. En la cuarta fase se entregan los resultados de la investigación, que como se menciono anteriormente es el diseño de rutas óptimas y finalmente se mencionan las conclusiones, agradecimientos y recomendaciones necesarias. La elaboración de este trabajo pretende demostrar como la optimización de las rutas ayudan a reducir los costos de transportación.

Palabras Claves: Enrutamiento vehicular, paraderos, vehículos, optimización, ventanas de tiempo.

Abstract

This article implements a mathematical programming model that has as main objective the design of routes, the same that meets the constraints of time windows, vehicle capacity of a company which performs the function of transporting personnel to other entities. It is structured as follows: The first part contains an introduction to the problem. The second section is a study of the current business situation, involving, bus stops, customers, vehicles and costs of the routes defined by the company. The third stage analyzes the mathematical model that best fits the actual conditions. In the fourth phase the results of the investigation are given, which as mentioned above is the design of optimal routes and finally the conclusions, acknowledgments and necessary recommendations are mentioned. The preparation of this paper aims to demonstrate how route optimization helps reduce transportation costs.

Keywords: Vehicle routing, bus stops, vehicles, optimization, time windows.

1. Introducción

El transporte es un medio muy usado por los seres humanos, por lo que se convierte en una necesidad donde se encuentran presentes elementos tales como infraestructura, vehículo y operador. Esta tesis presenta una alternativa técnica desarrollada por la investigación de operaciones, con el objetivo de crear rutas basados en un depósito para transportar a los empleados desde cierto paradero hasta su lugar de trabajo, el cual consiste en aplicar una programación matemática y a través de ella encontrar una solución

para el problema de enrutamiento vehicular con restricción de capacidad y ventanas de tiempo, que permita minimizar el costo de la ruta.

Existen factores que son difíciles de parametrizar como son el tráfico accidentes de tránsito, huelgas, desastres naturales por lo que se opta la aplicación de métodos muy prácticos en sus operaciones, lo cual no es una buena planificación que influyen en altos costos e insatisfacción del cliente.

2. Descripción de la situación actual

Actualmente la empresa realiza la planificación de sus rutas de manera tradicional, lo que significa que no existe optimización en sus procesos, por lo que genera un alto costo al brindar un buen servicio para poder cumplir con los requerimientos de sus clientes, ya que en algunas rutas existe un exceso en la capacidad del vehículo y en otras existe carencia de clientes, esto se debe a la mala distribución de los mismos en las rutas. Ellos cuentan con 15 vehículos para realizar el recorrido a sus clientes.

Por otro lado se encuentra el tema de los horarios ya que todos los clientes deben estar presentes en el destino antes de las 6h20 en el caso las rutas de Operaciones, 7h40 en Facturación y a las 8h25 para el personal administrativo sin importar los inconvenientes que se presenten en el camino.

2.1 Rutas

La compañía tiene establecidas 12 rutas, las cuales están distribuidas en tres departamentos antes mencionados que son: Operaciones con 5 Rutas, CFS-Facturación con 3 Rutas y Administrativo con 4 Rutas. En la tabla 2.1. se muestra los paraderos y tiempo de llegada de la ruta 14

Ruta 14 - centro sur	Tiempo estimado de llegada
José de antepara y quiquis	07h35
Cdla. Bellavista	07h46
Tungurahua y letamendi	07h58
Tungurahua y Venezuela	08h02
Bolivia y Tungurahua	08h06
Trujillo y la 25 de julio	08h11
Cae	08h18
Puerto marítimo	08h25

Tabla 2.1. Ruta 14

3. El problema de ruteo capacitado con ventanas de tiempo (CVRPTW).

El problema de enrutamiento vehicular ha sido estudiado exhaustivamente, Bodin [1] realizó una profunda revisión del VRP y sus variaciones. Una de sus variaciones más estudiadas es el Problema de Enrutamiento Vehicular con Ventanas de tiempo, este es un problema extremadamente práctico usado en industrias como distribución, recolección de pasajeros, servicio postal, etc.

Un eficiente ruteo con horario puede ayudar a la industria y al gobierno millones de dólares al año.

Solomon [2], realizó una distinción entre una ventana de tiempo flexible y dura. Una ventana de tiempo es dura si el vehículo llega muy tarde donde el cliente, este ha tenido que esperar. Además, si a un vehículo no se le permitirá dar el servicio si llega tarde donde el cliente. En una ventana de tiempo dura la restricción de tiempo puede ser violada pero es penalizada con un costo.

En 1985, Savelsberg [3] mostró que un VRPTW es NP-hard, ahí su investigación con el VRPTW implicó el desarrollo de heurísticas que daban como un buen resultado cercano al óptimo. En la figura 3 presentamos un ejemplo del Problema de Enrutamiento vehicular capacitado con ventanas de tiempo

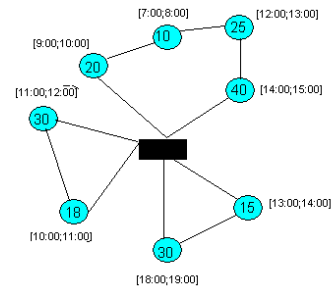


Figura 3. Figura ejemplo

3.1 Datos

- K** flota de vehículos
- Q** capacidad del vehículo
- c_{ij}** costos relacionado al arco $(v_i, v_j) \in A$
- q_i** demanda de la parada i
- f_k** costos fijos
- p_{vi}** penalización por atraso por atender la parada v_i
- s_{vi}** tiempo de servicio de la parada i
- $[e_{vi}, l_{vi}]$** ventana horaria de la parada i

3.2 Variables de decisión

- x_{ijk}** 1 si el vehículo k se desplaza por el arco (v_i, v_j)
- t_{vi}** El tiempo en el que empieza el servicio v_i
- r_{vi}** Tiempo de retraso de atender a v_i

$$\text{Minimizar} \sum_{k \in K} \sum_{(v_i, v_j) \in A} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{(v_i, v_j) \in A} f_k x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{v_i \in V_c} p_{vi} \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(v_i, v_j) \in A} x_{ijk} = 1 \quad \forall v_i \in V_c \quad (2)$$

$$\sum_{v_j \in \Delta^-(v_k)} x_{v_j k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{v_i \in V_c} q_i \sum_{v_j \in \Delta^-(v_i)} x_{ij} \leq Q \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{v_j \in \Delta^-(v_k)} x_{ij} - \sum_{v_j \in \Delta^+(v_k)} x_{jk} = 0 \quad \forall k \in K, v_i \in V_c \quad (5)$$

$$h_{v_i} - h_{v_j} \geq s_{v_i} + t_{ij} + M(1 - x_{ij}) \quad \forall (v_i, v_j) \in A, k \in K \quad (7)$$

$$e_{v_i} \leq h_{v_i} \leq l_{v_i} + r_{v_i} \quad \forall v_i \in V \quad (6)$$

El objetivo del CVRPTW es construir un conjunto de rutas con un costo mínimo que visiten todas las paradas en el horario establecido respetando la capacidad de los vehículos. Como podemos ver la ecuación (1) suma los costos asociados c_{ij} con las visitas a las paradas v_i , los costos fijos f_k por el uso cada uno de los vehículos k , además de la suma de las penalizaciones p_{vi} dadas por infringir el horario de visitas de los paraderos.

Todos las paradas $v_i \in V_c$ deben ser visitados una sola vez y por un único vehículo k , ecuación 2.

Todos los vehículos k parten del depósito v_0 al iniciar las rutas, ecuación 3

La suma de las personas recogidas en los paraderos no puede exceder la capacidad Q del vehículo $k \in K$, ecuación 4.

Todas las paradas son visitadas una sola vez y solo por único vehículo, es decir la parada v_i es atendida por el vehículo k , entonces las paradas sucesoras y antecesoras deben ser servidas por el mismo vehículo, ecuación 5.

El tiempo de servicio de v_i debe ser menor igual a la cota inferior de la ventana de tiempo del paradero v_i-1 , pero también se permiten atrasos, como lo expresa la ecuación 6.

La siguiente ecuación plantea una continuidad en el tiempo, además elimina los subtours, esto quiere decir si un vehículos k viaja de v_i hasta v_j lo debe hacer en el tiempo $h_{v_i} + s_{v_i} + t_{ij}$, ecuación 7

4. Análisis computacional (Aplicación del modelo Matemático VRPTW)

En la actualidad la tecnología se ha vuelto una necesidad, que permite al ser humano sentirse

ayudado y de esta manera poder cumplir con las metas que se ha propuesto. Para esto se ha descubierto ciertas herramientas que en este caso son de gran beneficio para el área del transporte. Lo cual facilita el trabajo permitiendo el uso adecuado de los recursos en una organización.

4.1. Gams

Para llevar a efecto el diseño de las rutas, se recurrió a la ayuda de un el software informático llamado GAMS [4] (General Algebraic Modeling System) es un lenguaje de programación que permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización. La figura 4.1 muestra los resultados en Gams.

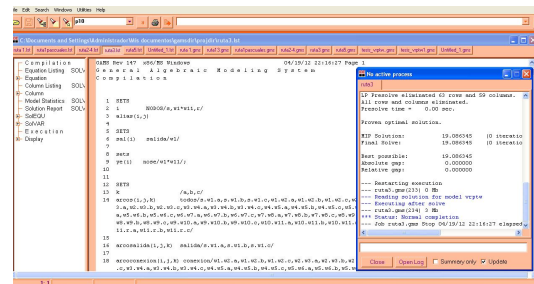


Figura 4. Figura ejemplo

4.2. Resultados Obtenidos

Al aplicar el modelo matemático con el software informático Gams, este dará como resultado las variables de decisión (Costo Total, Variable binaria, Tiempo en que pasa el bus por cada parada, Tiempo de atraso).

4.2.1. VRPCTW versus ANALISIS ACTUAL. Al insertar nuevos arcos, lo cual dará nuevas opciones de rutas, con menos kilometraje, existirá una reducción en los costos de las diferentes rutas, por lo que se puede llegar a la siguiente comparación mostrada en la tabla 4.2.1

Nombre	Actual	Propuesta
Ruta 1	\$ 532,98	\$ 459,38
Ruta 1-pascuales	\$ 397,39	\$ 338,94
Ruta 2-4	\$ 213,85	\$ 279,96
Ruta 3	\$ 193,63	\$ 187,46
Ruta 5	\$ 564,28	\$ 521,18
Ruta 7	\$ 1.456,30	\$ 1.371,80
Ruta 8	\$ 744,41	\$ 736,42

	Ruta 9	\$ 684,51	\$ 661,70
Ruta 12	\$ 703,12	\$ 571,12	
Ruta 13	\$ 698,12	\$ 671,70	
Ruta 14	\$ 366,09	\$ 307,96	
Ruta 15	\$ 578,52	\$ 446,12	

Tabla 4.2.1: Comparación de los costos actuales con la nueva propuesta

En la Figura 4.2.1 se puede comparar las dos situaciones, por lo que se observa que en la propuesta existe un ahorro muy significativo para la empresa mensualmente.

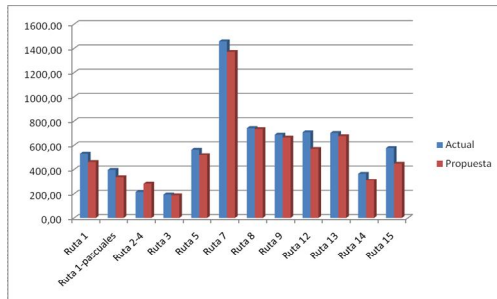


Figura 4.2.1. Comparación con la situación actual

El costo actual mensual de todas las rutas es de \$ **7133,20** con nuestra propuesta el costo sería \$ **6553,64**, el ahorro sería de \$ **579,43** esto representa un 8% de ahorro.

La tabla 3.2.2 muestra el porcentaje de ahorro mensual que se obtiene usando nuestra propuesta

Nombre	Ahorro mensual
Ruta 1	7%
Ruta 1-pascuales	6%
Ruta 2-4	3%
Ruta 3	3%
Ruta 5	8%
Ruta 7	20%
Ruta 8	10%
Ruta 9	10%
Ruta 12	10%
Ruta 13	10%

Ruta 14	5%
Ruta 15	8%

Tabla 4.2.2: Porcentaje de ahorro mensual

5. Conclusiones

La programación matemática presenta la mejor solución, aun siendo un poco inflexible a problemas con muchas variables, pero a problemas medianos como este, genera muy buenos resultados. También existen otras alternativas como las heurísticas y meta heurísticas con estas solo se obtiene una buena solución sin llegar al óptimo; son un poco más elásticos con problemas mayores.

Tenemos un ahorro significativo al analizarlo por rutas por ejemplo en la ruta 7 obtiene un ahorro mensual del 20%, las rutas 8, 9, 12 y 13 obtienen el 10%, ruta 14 el 5% y la ruta 15 el 8%

Se aplicó el algoritmo considerando un tiempo de servicio en cada parada de 2 minutos, esto se determinó al tomar el tiempo físico en cada paradero y sacar un promedio.

6. Recomendaciones

Se debería de reconsiderar la ubicación de paraderos, no convendría estar demasiados seguidos en algunos casos, se recomienda incluir las rutas con paraderos parecidos en una sola. Por ejemplo en la ruta 12 de administrativo tiene la parada de la rotonda y dos cuadras después existe otra parada debería consolidarse toda en un punto medio de ambas.

También una vez que los vehículos de operaciones terminen sus rutas debería ser usadas para realizar las rutas de administración así se ahorraría recursos.

7. Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestros profesores los cuales nos han guiado a lo largo de nuestra carrera, a nuestros padres por su apoyo incondicional, y a la empresa la cual nos abrió las puertas para realizar el análisis.

8. Referencias

- [1] Bodin, L., Golden, B., Assad, A. and Ball, M. (1983) "Routing and Scheduling of Vehicles and



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**



Crews: The State of the Art,” Comput
.Opns. Res vol. 10, pp. 62-212.

- [2] Solomon, M.M. and Desrosiers, J: (1988) ”Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems: A Survey”. Transportation Science vol. 22 (1), pp. 1-11
- [3] Starkweather. T., McDaniel S., Mathias K., Whitley D. and Whitley C. (1991) “A Comparison of Genetic Sequencing Operators”. Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms. Morgan Kaufmann Pub
- [4] Pedregal Pablo , Ricardo García, Enrique Castillo, Antonio J. Conejo y Natalia Alguacil (2002)” Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.” pp.1-574