

Title: Analysis, selection and assignment of vehicles to distribution routes for finished goods using mixed integer linear programming

Authors: VELARDE-CANTÚ, José Manuel, LÓPEZ-ACOSTA, Mauricio, CHACARAMONTES, Allán and RAMÍREZ-CÁRDENAS, Ernesto

Editorial label RINOE: 607-8695

VCIERMMI Control Number: 2023-02

VCIERMMI Classification (2023): 261023-0002

Pages: 19

RNA: 03-2010-032610115700-14

MARVID - Mexico

Park Pedregal Business. 3580-
Adolfo Ruiz Cortines Boulevard –
CP.01900. San Jerónimo Aculco-
Álvaro Obregón, Mexico City
Skype: MARVID-México S.C.
Phone: +52 | 55 6159 2296
E-mail: contact@marvid.org
Facebook: MARVID-México S. C.
Twitter: @Marvid_México

www.marvid.org

Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

Introducción

- Dos de las actividades primordiales en el crecimiento o desarrollo económico de una empresa son el transporte de productos terminados y la logística, estas a su vez impulsan o potencializan las diversas inversiones en mejoras en los procesos productivos, capacitaciones de nuevas tecnologías, infraestructura las cuales están encaminadas a ayudar en el manejo adecuado de los recursos logísticos disponibles en la organización.
- En un contexto global la apertura comercial juega un papel fundamental en la búsqueda de elevar la competitividad en cualquier área de la empresa con el objetivo de disminuir los costos relacionados a la logística interna o externa, así como también a los tiempos utilizados para el traslado de los productos o mercancías en los que se incluyen los procesos de abastecimiento y/o entregas de producto terminado por medio de la utilización de los diferentes modos de transporte a su alcance.

- El sector de la logística en México en la actualidad ha conseguido avances significativos en esta área.
 - Se puede considerar a los sistemas de rastreo satelital de productos
 - Los múltiples sistemas de calidad con procesos eficientes gracias a la aplicación de tecnologías con lectores de código de barras e identificación por radiofrecuencia (RFID), los cuales proporcionan información en tiempo real y facilitan la comunicación eficiente y constante entre los diversos operadores logísticos, proveedores, administradores y clientes con el fin de mejorar la confianza entre ellos.
- México representa en logística un mercado en crecimiento sumamente importante, con diversos objetivos cada uno de ellos claros y bien definidos. Con el desarrollo de esta área actualmente es posible transportar una gran variedad de productos y /o materiales que van desde agua, alimentos, medicina, hasta materiales para construcción ya sea empaquetados o a granel etc. a lugares de acceso complicados o remotos que en un tiempo atrás era imposible llegar, logrando con esto el desarrollo económico de estas regiones al formar parte de una cadena de suministro (CDS) eficiente.

- Aun y gracias a estos avances en materia de transporte e infraestructura logística, siguen existiendo múltiples áreas de oportunidad o de mejora.
 - Un ejemplo muy práctico en el que se puede observar un área de oportunidad de mejora es en la complejidad del manejo de los sistemas de información al momento de realizar un rastreo de carga eficiente en tiempo real, esto es debido al uso de diversos modos de transporte para hacer llegar el producto hasta el cliente final.
 - Otra oportunidad se tiene a la utilización de técnicas o herramientas de optimización adecuadas que, aunque su aplicación ha ido en aumento aun no es suficiente o no alcanza su potencial requerido, de igual manera de cuenta con equipos de abastecimiento, producción, transportación y/o distribución obsoletos, esto último ocasiona que los costos de mantenimiento de los vehículos sean mayores

- México representa en logística un mercado en crecimiento sumamente importante, con diversos objetivos cada uno de ellos claros y bien definidos. Con el desarrollo de esta área actualmente es posible transportar una gran variedad de productos y /o materiales que van desde agua, alimentos, medicina, hasta materiales para construcción ya sea empaquetados o a granel etc. a lugares de acceso complicados o remotos que en un tiempo atrás era imposible llegar, logrando con esto el desarrollo económico de estas regiones al formar parte de una cadena de suministro (CDS) eficiente.
- México representa una plataforma logística fundamental donde a través de ella se desarrollan diversas infraestructuras terrestres como puentes y carreteras, también áreas como aeropuertos de primer nivel y marítimos como son los puertos entre otros; aunque, no obstante, aún existe mucho por trabajar, desarrollar y enfrentar retos como los que podemos destacar en la Tabla 1

- Una visibilidad global de inicio a fin en las CDS.
- Cooperación y sincronización entre CDS.
- Cambio climático y energías renovables.
- Utilización eficiente de tecnologías de información.
- Desarrollo en las condiciones y características de la infraestructura terrestre, aérea y marítima.
- Ajuste y respeto a las leyes y reglamentos para lograr una logística más competitiva, integral y segura.
- Mejorar la seguridad para la entrega de los productos, a su destino en tiempo y forma.
- Disminuir los costos de transporte, considerando el aumento en las tarifas de carga conforme suben los niveles de inseguridad.

Tabla 1. Retos a considerar en el área logística

- ▶ La investigación presentada proviene de la necesidad de establecer una forma estructurada y sistemática de realizar la distribución adecuada del producto terminado desde la planta de producción hasta el cliente final, en donde solo se consideran viajes directos entre la planta o el centro de distribución y el cliente final, a esta característica especial se le denomina como una red de distribución tipo estrella ver Figura 1

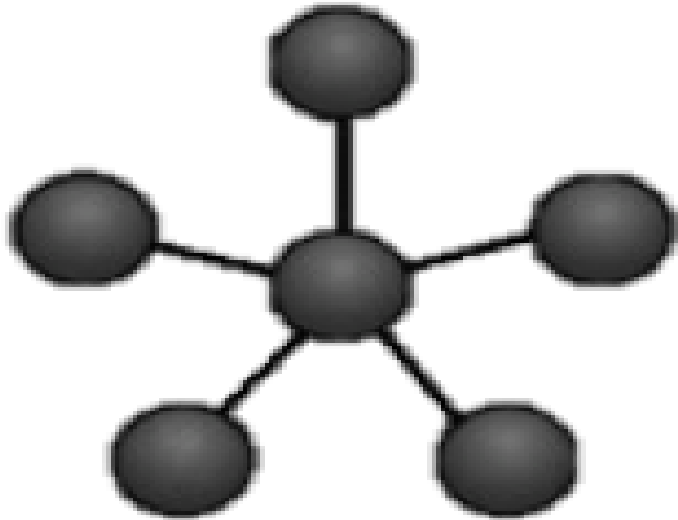


Figura 1 *Red Tipo Estrella*

- ▶ La empresa no cuenta con un método, herramienta o sistema que facilite de manera sistemática la asignación de los distintos viajes a realizar para garantizar el cumplimiento con la demanda de cada cliente lo que repercute en retrasos en las entregas aumentado así los tiempos de traslado, de servicio, produciendo una cadena de problemas derivados unos de otros que resultan directamente en el aumento en los costos de distribución

- ▶ Lo que se pretende es establecer un sistema de distribución que no solo considere las políticas de distribución internas de la empresa, sino que también las buenas practicas del uso responsable de los recursos logísticos disponibles, utilizando para esto el diseño de una red de distribución donde se encuentran localizados los clientes con características especiales del problema y con el objetivo principal de disminuir los costos totales de transporte.

Metodologia

- ▶ En la actualidad la utilización de modelos matemáticos aplicados a problemas de la vida cotidiana de cualquier ámbito ha aumentado considerablemente, problemas especiales con el de transporte en programación lineal ha beneficiado al empleo de nuevas técnicas de optimización más eficientes con el objetivo de disminuir el uso de los recursos limitados que se tienen.
- ▶ Dentro de estos problemas de transporte se tiene el problema de ruteo de vehículos (VRP) por sus siglas en inglés, en Elatar et al, (2023) describen una serie de consideraciones generales relacionadas con del VRP entre las cuales mencionan que el problema es del tipo combinatorio, NP-difícil y que fue mencionado por primera vez en 1959 por Dantzing, cuyo objetivo principal es definir las rutas optimas de los vehículos que parten de un depósito o planta y que abastecen a cada cliente una vez para luego regresar al depósito (es decir al punto de partida), desde sus inicios, la investigación en la literatura de esta área ha crecido rápidamente y provocando que aparecieran muchas variables del VRP, entre estas se cuenta con el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW) cuya característica diferenciadora es que se manejan dos limites uno inferior llamado (l_i) y uno superior llamado (U_i) para identificar el tiempo de apertura y cierre de la ventana de tiempo en la cual debe ser atendido el cliente (l_i, U_i).

- ▶ Por otra parte, se puede observar como aborda el Problema de Ruteo de Vehículos con Carga/Descarga (VRPB) (Mula et al, 2010), este tipo de problemas los podemos observar en sistemas de distribución en empresas como Sabritas, Bimbo, Coca-Cola, Pepsi etc. en donde existen actividades de recolección y entregas que pueden o no ser simultaneas, de las misma forma podemos encontrarlo en sistemas como el transporte de personal, escolar, sistemas de recolección de basura, servicios de entrega o recolección a domicilio como las mensajerías o paqueterías, servicios de taxis, servicios de entrega de comida, todos y cada uno de estos problemas pueden ser abordados desde una perspectiva de modelado similar.
- ▶ Para resolverlo, los investigadores han probado primero los métodos exactos, luego las heurísticas y, por último, las metaheurísticas.
- ▶ La utilización de un método exacto para abordar este problema fue de acuerdo a un análisis extenso de la literatura existente de tal forma de que el utilizar un modelo matemático aplicado al VRP garantizaría obtener una solución óptima en un tiempo de solución aceptable considerando el tamaño del problema aquí expuesto.

- ▶ Programación Lineal Mixta
- ▶ Para obtener la solución se utilizó el software AMPL como interface con el optimizador CPLEX versión 12.10.
- ▶ Aún y cuando a la selección de la técnica de solución exacta puede ser considerada como arriesgada esto, es cuando los tamaños de los problemas son considerados como grandes, no lo es cuando el tamaño de los problemas es de tamaño pequeño a mediano llegando así a obtener resultados óptimos en tiempos relativamente razonables.

Modelo matemático

Índices:

i: Índice utilizado para identificar el cliente $i \in \{1, \dots, m\}$

j: Índice utilizado para identificar cada tipo de vehículo $j \in \{1, \dots, n\}$

Parámetros:

I_i : Número total de clientes *i*

W_i : Demanda a la semanal del cliente *i* en viajes

P_j : Capacidad del vehículo *j*

C_{ij} : Costo por visitar al cliente *i* por el vehículo *j*

Y_j : Tiempo total disponible de la jornada de trabajo para el vehículo *j*

t_{ij} : Tiempo de traslado del cliente *i* por el vehículo *j*

Variables de decisión

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } j \text{ visita la cliente } i \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Fórmula 1. Función objetivo

$$F.O \text{ Min } z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

Fórmula 2. Restricción correspondiente al cumplimiento con la demanda de cada cliente.

$$\sum_{j=1}^n P_j X_{ij} \geq W_i \quad \forall i \quad (2)$$

Fórmula 3. Restricción que define la visita del vehículo al cliente o permanece en el centro de distribución.

$$X_{0j} + \sum_{i \neq 0}^I X_{ij} = 1 \quad \forall i, j \quad (3)$$

Fórmula 4. Restricción la cual establece el tiempo de traslado por viaje del vehículo j al cliente i.

$$\sum_{i=1}^I t_{ij} X_{ij} \leq Y_j \quad \forall i \quad (4)$$

Fórmula 5. Restricción de no negatividad.

$$X_{i,j} \geq 0, \quad (5)$$

Resultados

- ▶ El modelo matemático presentado en la investigación utiliza la programación lineal entera mixta abordando el VRP en su forma básica considerando que la red de distribución es una red tipo estrella, buscando cumplir con el objetivo central del estudio. La solución que aquí se presenta consideran los valores de todas las variables de decisión, así como también el cumplimiento de cada una de las distintas restricciones que componen el modelo, que de manera conjunta define la solución óptima a este problema.
- ▶ Se presenta la solución al problema práctico aquí expuesto en donde se requiere contar con una programación de envíos de productos en cada vehículo a cada uno de los clientes con el objetivo central de disminuir los costos de distribución, de la misma manera que se busca eficientar la utilización de los recursos logísticos con los que cuenta la organización.

- En este problema practico se consideró un total de diez clientes con demanda distintas ver Tabla 2, así mismo se cuenta con cinco vehículos con capacidades no homogéneas es decir con capacidades distintas, se consideran que estos vehículos pueden hacer un total de cinco viajes a lo más semana, de la misma forma se establecen los tiempos totales disponibles para operar a la semana y los costos por visitar a cada cliente por cada vehículo desde la planta o el centro de distribución ver Tabla 3.

Cliente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Demanda Semanal (Viajes)	1	7	2	1	1	1	3	1	9	3

Tabla 2. Demanda de cada uno de los clientes en viajes a la semana

	Vehículos				
Cliente	1	2	3	4	5
1	-	-	1,995	-	-
2	-	1,945	-	2,187	2,295
3	-	-	3,342.5	-	-
4	-	-	3,342.5	-	-
5	-	-	2,295	-	-
6	-	-	947.5	-	997.5
7	-	-	-	-	7,685
8	-	-	-	997.5	-
9	1,945	-	2,647	-	3,150
10	-	1,945	-	2,187	-

Tabla 3. Costos por visitar a cada cliente por cada vehículo

- ▶ En esta sección se reportan los resultados obtenidos con la aplicación del modelo matemático en programación lineal entera mixta al VRP caso práctico, para la búsqueda de la solución se utilizó el software AMPL con el optimizador CPLEX con la versión 12.10 obteniendo resultados muy favorables en la búsqueda de minimizar los costos de distribución y transporte incluidos en los viajes de cada vehículo utilizado, a continuación, se puede observar en la Tabla 4. la distribución de estos vehículos y cuantos viajes tienen que hacer para satisfacer la demanda a cada cliente.

	Clientes									
Vehículos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									5	
2		2								3
3	1		2	1	1	2				
4		4						1		
5		1				1	3			

Tabla 4. Distribución de viajes a realizar por vehículo a cada cliente

- ▶ De acuerdo a esta configuración de distribución de viajes de los vehículos a cada cliente se tiene como resultado un costo total según los parámetros utilizados de 77640 con una distribución de viajes totales por vehículo que se puede observar en la Tabla 5. En esta misma tabla se puede observar el total de viajes realizados por todos los vehículos y que también presenta un cierto equilibrio entre los viajes realizados por los mismos a excepción del vehículo 3 el cual realiza dos viajes más debido a las características propias del problema abordado.

Vehículos	Viajes realizados por Vehículo
1	5
2	5
3	7
4	5
5	5
Total de Viajes	27

Tabla 5. Total, de viajes realizados por vehículos

Conclusiones

- ▶ Con la aplicación del modelo matemático básico al VRP del caso práctico y utilizando la programación entera mixta con ayuda del software AMPL se logró disminuir los costos asociados a todas aquellas actividades relacionadas a las operaciones del transporte y/o distribución de los productos terminados que maneja la empresa.
- ▶ Se definió la selección y asignación correcta de que vehículo debería de visitar a cada cliente y cuantos viajes debería de realizar a fin de cumplir con la demanda de cada uno de ellos.
- ▶ Con estos resultados la compañía podrá establecer una metodología de forma sistemática que de ayude a eficientar las actividades que influyan directamente en la utilización de los recursos logísticos disponibles, brindándole así la oportunidad de elevar su competitividad con el objetivo de crecer y mejorar la rentabilidad de la empresa.

Referencias

- Beaulieu M., Gamache M., An enumeration algorithm for solving the fleet management problem in underground mines, *Computers & Operations Research*, Vol. 33 Pág. 1606–1624 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.11.016>
- Brunner C., Giesen R., Klapp M., Florez L. Vehicle routing problem with steep roads. Elsevier, *Transportation Research Part A*. Vol. 151, Pág. 1–17, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.002>
- Dechampai D., Tanwanichkul L., Sethanan K., Pitakaso R., A differential evolution algorithm for the capacitated VRP with flexibility of mixing pickup and delivery services and the maximum duration of a route in poultry industry. *Journal of Intelligent Manufacturing* Vol. 28, Pág. 1357–1376, 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-015-1055-3>.
- Elatar S., Abouelmehdi K., Essaid M. The vehicle routing problem in the last decade: variants, taxonomy and metaheuristics, Elsevier, *Procedia Computer Science*. Vol 220. Pág. 398–404, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.051>.
- Guedria M., Malhene N., Deschamps J., Urban Freight Transport: From Optimized Routes to Robust Routes, *Transportation Research Procedia* Vol. 12, Pág. 413 – 424, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.076>.
- Kechmane L, Nsiri B, and Baalal A., A Mathematical Model to Optimize Transport Cost and Inventory Level in a Single Level Logistic Network, *Computational Problems in Science and Engineering*, Vol. 343, Pág. 271-281, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15765-8_15.
- Mula, J., Peidro, D., Diaz-Madronero, M., Vicens, E., Mathematical programming models for supply chain production and transport planning, *European Journal of Operational Research*, Vol. 204 (3), Pág.377-390, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.008>.
- Nucamendi S., Cardona Y., and Angel Bello F., Minimizing Customers' Waiting Time in a Vehicle Routing Problem with Unit Demands, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, Vol. 54, No. 6, Pág. 866-881, 2015. <https://doi.org/10.1134/S1064230715040024>.
- Okudea M., Taniguchi E., Hierarchical traffic network for heuristic approximation method of vehicle routing problems, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 125 Pág. 262 – 274, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1472>.
- Serdar A, Gen M, A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. *Computers & Industrial Engineering* Vol. 62. Pág. 755–761, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.11.025>.
- Veer K., Kumar S., An optimization model for vehicle routing problem in last-mile delivery, Elsevier, *Expert Systems With Applications* Vol. 222. Pág. 1-15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119789>



© MARVID-Mexico

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. VCIERMMI is part of the media of MARVID-Mexico., E: 94-443.F: 008- (www.marvid.org/booklets)