

Modelo matemático para la planificación de servicios y programación de rutas en empresas prestadoras de servicios de control de plagas

Jhon Wilmer Escobar



DOCTORADO EN
INGENIERÍA

Con enfoque hacia la innovación y el emprendimiento de base tecnológica

Resolución No. 363 DEL 14 de enero de 2016 y 06296 del 6 de abril del 2016 Vigencia 7 años.



Resolución de Acreditación de Alta Calidad
16740 del 24 de agosto de 2017, vigencia 4 años



Resolución de Acreditación de Alta Calidad
10820 del 25 de mayo de 2017, vigencia 6 años



Resolución de Acreditación de Alta Calidad
08676 del 17 de junio de 2015, vigencia 4 años



#SoyInnovador

Resumen

El artículo aborda el problema de la programación de servicios y planificación de rutas para empresas prestadores de servicio de control de plagas, considerando la **minimización de los costos** relacionados con las **distancias recorrida** por los vehículos usados y el **costo del tiempo de ocio** de los operarios. El problema considera actividades programadas, fechas de atención no disponibles, capacidad instalada y datos de demanda previa obtenida de los clientes. En partícula, se propone un modelo de programación lineal entera mixta, que busca **mejorar la gestión logística** de las empresas que pertenecen a este sector.

Descripción del problema

El objetivo fundamental de la problemática es asignar nodos(clientes) a redes (rutas) **minimizando la suma de los costos de transporte y los costos asociados al tiempo de ocio de los operarios.** Se han considerado restricciones de **capacidad de servicios, eliminación de subrutas y cumplimientos de demanda.**

Descripción del problema

Este problema se enmarca dentro del problema de **Ruteo de Vehículos (VRP)**, el cual consisten en la determinación de un conjunto de rutas para una flota de vehículos que parten de un deposito, las cuales deben satisfacer la demanda de varios clientes ubicados geográficamente en sitios diferentes.

Una de las variantes del problema VRP, en donde se considera restricciones en el horario o tiempos de atención, se conoce como **VRPTW**. En este se suponen dos tipos de ventanas de tiempo(horario de atención): duras y suaves.

Recopilación de datos e información

Para el desarrollo del modelo propuesto, se tienen en cuenta aspectos como la **capacidad instalada, la demanda, el numero de operarios**, y otros elementos. Las decisiones del modelo están relacionadas con la asignación de operarios y generación de rutas para los servicios demandados por un conjunto de clientes. El modelo considera la siguiente notación.

Conjuntos

- Vértices del grafo $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ considerando los puntos de servicio $\{v_1, \dots, v_n\}$ y el centro de operaciones $\{v_0\}$; indexados por i y j .
- Arcos del grafo $E=\{(v_i, v_j): i \neq j\}$.
- Operarios indexados por k .

Parámetros

- T_{ij} : Tiempo promedio de recorrer el arco (v_i, v_j) en minutos.
- CT_{ij} : Costo de transporte por unidad de tiempo del arco (v_i, v_j) (\$/min).
- S_{ik} : Tiempo promedio del servicio i realizado por el operario k en minutos.
- CO_k : Costo del operario k por unidad de tiempo (\$/min).
- P_k : Número máximo de servicios que pueden ser asignados al operario k .
- TP_k : Tiempo máximo por turno de trabajo del operario k en minutos.
- n : Número de vértices del grafo.

Variables de decisión

Variables de decisión

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el arco } (v_i, v_j) \text{ es visitado por el operario } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad \forall (v_i, v_j) \in E; k \in K$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } i \text{ es asignado al operario } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad \forall i \in V \setminus \{v_0\}; k \in K$$

$$u_i = \begin{cases} \text{Número de nodos visitados en cada ruta hasta el} \\ \text{nodo } i \end{cases} \quad \forall i \in V$$

$$W_{ik} = \begin{cases} \text{Instante de tiempo donde inicia el servicio } i \text{ ofrecido} \\ \text{por el operario } k \end{cases} \quad \forall i \in V; k \in K$$

$$TO_k := \text{Tiempo ocioso del operario } k \quad \forall k \in K$$

Criterio de optimización

Función objetivo

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in v} \sum_{j \in v} \sum_{k \in k} T_{ij} C T_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in k} C O_k T O_k \quad (1)$$

La función objetivo suma los costos de las distancias recorridas por los operarios y los costos del tiempo de ocio de los mismos. Notar que el tiempo de ocio depende del tiempo de recorrido y del tiempo de servicio empleado

Restricciones

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{v_0\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in V; k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{v_0\}} x_{v_0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{u \in V \setminus \{v_0\}} x_{v_0uk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 \quad \forall j \in V \setminus \{v_0\}; k \in K \quad (5)$$

$$u_i + 1 \leq u_j + n(1 - x_{ijk}) \quad \forall i = 2, \dots, n; i \neq j; j = 2, \dots, n; k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ijk} \leq p_k \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$W_{ik} \leq TP_k \quad \forall i \in V; k \in K \quad (8)$$

El conjunto de restricciones en(2) garantiza que cada cliente sea visitado exactamente por un solo operario y que solamente tenga un predecesor en la secuencia de la ruta. Las siguientes dos restricciones aseguran continuidad de cada ruta y adicionalmente que cada una de ellas comience y termine en el mismo deposito. La restricción (5) permite que cada cliente sea asignado al servicio del operario, solamente si existe una ruta que lo una. La eliminación de la subruta se realiza mediante el conjunto de restricciones en (6). El numero de servicios por operario es limitado en (7) mientras que el tiempo máximo de procesamiento lo impone (8)

Restricciones

$$TO_k = TP_k - \left[\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} T_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in V \setminus \{v_0\}} S_{ik} Y_{ik} \right] \quad k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = y_{ik} \quad \forall i \in V \setminus \{v_0\}; k \in K \quad (10)$$

$$W_{ik} \sum_{j \in V} M x_{ijk} \quad \forall i \in V; k \in K \quad (11)$$

$$W_{ik} + S_{ik} + T_{ij} - W_{jk} \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i \in V; j \in V; k \in K \quad (12)$$

$$ui \geq 0 \text{ entera}; x_{ijk} \in \{0, 1\}; y_{ik} \in \{0, 1\}; W_{ik} \geq 0; TO_k \geq 0 \quad \forall i \in V; j \in V; k \in K \quad (13)$$

La restricción (9) es el tiempo de ocio de cada operario, en donde calcula a través de la diferencia entre la duración del turno y la sumatoria de los tiempos de servicio y los tiempos de traslado a su ruta asignada. En (10), se limita a que un servicio sea realizado por operario solamente si existe una ruta que convenga al cliente. En (11) se asegura que el servicio en el nodo no se pueda iniciar, si el arco no ha sido asignado a la ruta del operario. En (12) se limita el tiempo de inicio de un servicio, teniendo el cuenta, el tiempo de traslado del operario y el tiempo de servicio del predecesor de la ruta. Finalmente en (13) se indica la naturaleza de las variables

Resultados- Caso de estudio

Una compañía en Cali, lleva a cabo labores de fumigación con **6** operarios que han sido categorizados como : **experimentados, aprendices, novatos y junior**. Según políticas de la empresa, en cada jornada pueden realizar **cuatro servicios**. Adicionalmente, la compañía cuenta con un muero suficiente de quipos para prestar los servicios. En promedio la compañía recibe **26 solicitudes diarias** de servicio(demanda), las cuales se conocen un día antes y deben ser satisfechas. La demanda se clasifica según el tipo de control (liquido o seco) y el área considerada(muy pequeña, pequeña, mediana, grande y muy grande). Se maneja un margen de tiempo de atención(antes o después de la hora acordada) de **15 minutos**. El **horario de trabajo** según la jornada es: 8am a 12m, 2pm a 6pm y 6pm a 10pm.

El problema se ha programado en AMPL y se ejecuta usando el solver CPLEX.

Resultados- Caso de estudio

En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos para un día típico de la compañía. Los resultados del modelo se comparan en la tabla 2, con la programación empírica de la compañía.

Tabla 1.

Resultados obtenidos del modelo matemático

Operario	Rutas de atención	Tiempo ocioso (min / día)	Función objetivo (\$ / día)	Tiempo de ejecución modelo (min)
1	0 – 3 – 19 – 5 – 15 – 24 – 0	26	401.547,62	11.23
2	0 – 13 – 20 – 14 – 18 – 2 – 0	9		
3	0 – 1 – 4 – 7 – 26 – 9 – 17 – 0	38		
4	0 – 25 – 6 – 10 – 0	33		
5	0 – 11 – 16 – 22 – 12 – 0	14		
6	0 – 21 – 8 – 23 – 0	46		

Tabla 2.

Comparación de resultados del modelo con la programación empírica

	Tiempo ocioso (min / día)	Función objetivo (\$ / día)
Modelo matemático	166	401.547,62
Programación empírica	301	526.380,32

Conclusiones

- Se puede observar que hay una reducción de 81.23% en tiempo ocioso de los operarios, así como un 23.71% en la reducción de los costos totales.
- En el contexto colombiano la mayoría de las empresas pequeñas y medianas que prestan los servicios de control de plagas, no cuentan con metodologías cuantitativas que le ayuden a tomar decisiones acertadas en la planificación de sus procesos logísticos. Esto se realiza de forma empírica, lo cual no deja de ser un experimento riesgoso que afecta directamente los ingresos, el numero de clientes y la reputación en el mercado



DOCTORADO EN INGENIERÍA

Con enfoque hacia la innovación y
el emprendimiento de base tecnológica

GRACIAS



Síguenos, hazte
fan y conéctate



Resolución de Acreditación de Alta Calidad
16740 del 24 de agosto de 2017, vigencia 4 años



Resolución de Acreditación de Alta Calidad
10820 del 25 de mayo de 2017, vigencia 6 años



Resolución de Acreditación de Alta Calidad
08676 del 17 de junio de 2015, vigencia 4 años