

Modelado para el diseño de rutas en un sistema de recolección de residuos sólidos urbanos

Jesús Racero Moreno¹, Ignacio Eguía Salinas¹, José Manuel García Sánchez¹, Gabriel Villa Caro¹

¹ Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Universidad de Sevilla. Calle Camino de los descubrimientos, s/n 41092. Sevilla. jrm@esi.us.es, ies@esi.us.es, jmgs@esi.us.es, gvc@esi.us.es

Resumen

El siguiente trabajo describe un modelo matemático para la resolución de la recolección de residuos urbanos sólidos mediante una flota de camiones con capacidad conocida y minimizando el tiempo y el número de recursos necesarios. El artículo está estructurado en cuatro bloques, en el primero se describe la problemática asociada a la recogida de residuos urbanos indicando las principales características, a continuación se describen los modelos clásicos de resolución del problema, como problema del cartero chino, describiendo las características de cada uno y los algoritmos óptimos y aproximados empleados en la resolución. El tercer bloque se centra en la descripción un nuevo modelo de recogida caracterizado por disponer de varios vehículos con diferente capacidad, tiempo límite de recogida y con el objetivo de minimizar los recursos necesarios. Finalmente, se muestra un ejemplo que permite observar la dificultad del problema y concluir con la necesidad de utilizar métodos aproximados para su resolución.

Palabras clave: Modelado, Programación lineal, Recogida de residuos, Grafos

1. Introducción

En los últimos años el crecimiento económico ha conducido a un aumento y cambio del nivel de consumo que está estrechamente unido al incremento de la emisión de residuos sólidos urbanos. La recolección de estos residuos se ha convertido en un problema de especial importancia que cobra mayor énfasis cuando los recursos disponibles para su recolección son limitados

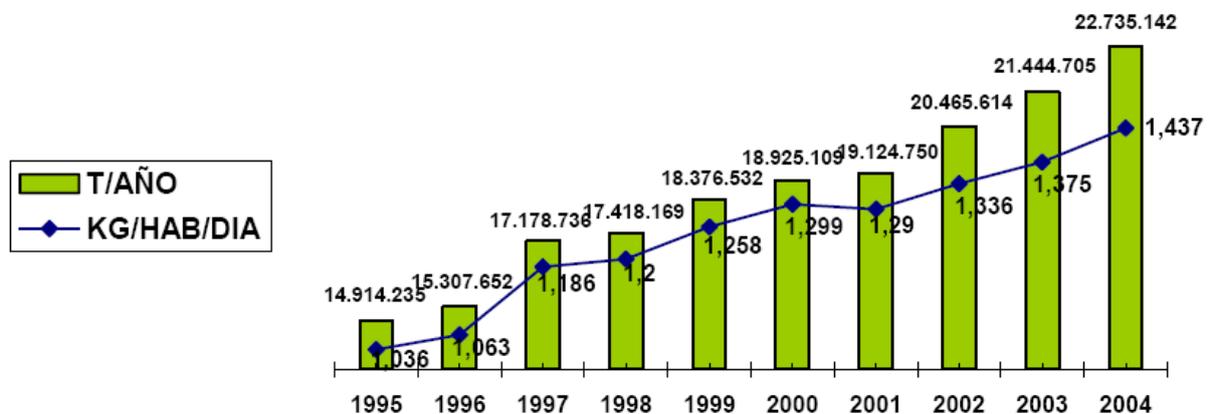
Un sistema de recogida de residuos urbanos puede dividirse en tres etapas, la primera se dedica a estimar y conocer las fuentes y cantidad de residuos generados. La segunda etapa objeto principal del trabajo se encarga del proceso de recogida de los residuos sólidos urbanos y finalmente el tratamiento o eliminación de los residuos.

A continuación se describe la primera y la última etapa ya que influyen sobre el proceso de recogida de residuos.

Según la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) se denominan residuos sólidos a “aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado un valor económico en el contexto en que son producidos”

La generación de residuos es una consecuencia directa de cualquier tipo de actividad desarrollada por el hombre; hace años un gran porcentaje de los residuos eran reutilizados en muy diversos usos, pero hoy en día nos encontramos en una sociedad de consumo que genera gran cantidad y variedad de residuos procedentes de un amplio abanico de actividades. En los hogares, oficinas, mercados, industrias, hospitales, etc. se producen residuos que es preciso recoger, tratar y eliminar adecuadamente.

Los ratios de producción de residuos de una población responden a varios parámetros; nivel socioeconómico, tamaño de la población, época del año, etc. En la actualidad, según el pasado Plan Nacional de Residuos Urbanos 2.007-2.015, se estima la producción media de R.S.U. en España en algo más de 1,4 Kg/día. En comparación, países del norte de Europa, alcanzan tasas de 1,5 a 2,5 Kg/día, en Estados Unidos se alcanzan los 2 Kg/día, destacando las grandes ciudades con cerca de 3 Kg/día, mientras que, en zonas de América del Sur, oscilan entre 0,4 y 0,8 Kg/día.



La recogida de los residuos urbanos consiste en su recolección para efectuar su traslado a las plantas de tratamiento. Básicamente existen dos tipos fundamentales de recogida :

- Recogida no selectiva.
- Recogida selectiva.

En la primera, los residuos se depositan mezclados en los contenedores, sin ningún tipo de separación. Ha sido la habitual hasta hace algunos años y utilizados en países en vías de desarrollo.

La recogida selectiva se hace separando los residuos según su clase y depositándolos en los contenedores correspondientes. Así, existen normalmente contenedores para el papel, vidrio, envases y la materia orgánica.

Este sistema requiere un elevado grado de concienciación y colaboración ciudadana para funcionar.

Los contenedores pueden estar ubicados en el contexto ciudadano o en áreas diferenciadas (Puntos limpios, Ecopuntos, etc).

La recogida en sí es un proceso complicado donde se deben conjugar las necesidades del servicio con la minimización de las molestias que se generan a los ciudadanos.

Por lo que respecta a la recogida en sí existen dos métodos:

- Recogida por medio de vehículos.
- Recogida neumática.

La más habitual es la primera. Se realiza por medio de vehículos especialmente preparados al efecto, camiones dotados de una tolva en la que se compactan los residuos u otros en los que se depositan sin compactar.

Se utilizan unos u otros según el tipo de residuos. Así la compactación es muy adecuada para los residuos orgánicos o los envases pero no se emplea en el caso del vidrio. Estos vehículos se perfeccionan más cada día con el fin de reducir las molestias que generan las operaciones de recogida.

El segundo tipo de recogida exige una cuantiosa inversión inicial en la construcción de las instalaciones que han de ir bajo tierra. Sólo es factible en áreas de nueva urbanización. A cambio exige un menor desembolso en costes de personal y genera muy pocas molestias a los ciudadanos. Comenzó a utilizarse en los países nórdicos en la década de los 60. Mediante un sistema de conducciones neumáticas subterráneas se conduce la basura hasta las estaciones de transferencia donde se procede a su traslado a la planta de tratamiento. En nuestro país existen algunas experiencias.

En relación al destino de los residuos la unión europea marca unas líneas generales de actuación que viene recogida en el plan de recogida de residuos sólidos urbanos 2007-2015 donde se establece la siguiente jerarquía:

- Reducción del volumen generado
- Reutilización
- Recuperación o reciclado
- Eliminación o vertido.

El estudio de la recolección, manejo y tratamiento de residuos sólidos urbanos está compuesta por una gran cantidad de tareas como son: los estudios de generación de basura, localización de contenedores donde los ciudadanos depositar los residuos, emplazamiento de centros de tratamiento de residuos, cuantificación de la flota, frecuencia, características de los vehículos de recogida, personal necesario para la recogida y diseño de las rutas a seguir.

El siguiente trabajo se centra en el diseño y resolución mediante de modelos de programación matemática del problema de recogida de residuos urbanos de contenedores mediante camiones que permita reducir costes de operación en relación a utilización de recursos.

2. Modelado del problema de recogida de residuos sólidos urbanos.

El diseño de rutas para la recolección de basura no es un problema fácil de resolver (VRP, Vehicle Routing Problem o bien CARP, Capacitated Arc Routing Problem), los algoritmos propuestos en la literatura no resuelven algunas veces de forma óptima la problemática, pero si mas cercana a la ideal y de máxima eficiencia comparada con el método actualmente utilizado, que en muchos casos complementan el conocimiento y experiencia profesional con

elementos cuantitativos. Las primeras herramientas propuestas se han utilizado en planificaciones a corto y mediano plazo, pero los cambios de operatividad pueden tener un costo importante de implementación. (Financieros, políticos y sociales), por ello se debe considerar también el largo plazo, un replanteamiento de rutas y posibles centros de transferencias de los Residuos Sólidos Domiciliarios.

En la literatura, se han descrito y desarrollado algoritmos asociados a la localización y diseño de rutas mediante modelos deterministas como Modelos de programación lineal (Hsieh y Ho, 1993). Estos modelos no contemplan diversos factores como la frecuencia de la recogida de residuos y el carácter aleatorio de las emisiones o depósitos de los ciudadanos. Este problema ha sido afrontado por Huang (et al, 1995) donde aplicando técnicas borrosas ha ampliado el campo para la aplicación de esta problemática.

En referencia al diseño de rutas, las primeras herramientas de diseño óptimo de rutas y frecuencias surgen en la década del 70, basados en ideas intuitivas, sin una formulación del modelo y su función objetivo, en algunos casos sin exploración del espacio de soluciones. Posteriormente, en la década de los 80, se formulan algunas funciones objetivo, y se incorporan nuevos parámetros tales como el cubrimiento de la demanda, factor de carga. (Axhausen y Smith, 1984).

El problema de diseño de ruta se ha desarrollado a partir del problema básico del TSP (Travelling Salesman problem, Lawler, 1995) que ha sido ampliamente estudiado para posteriormente ser ampliado con diferentes variantes.

Otro problema fundamental en el diseño de ruta con servicios asociados a los arcos es el VRP (Vehicle Routing problem) en el que el servicio es realizado mediante más de una ruta. El objetivo del problema puede ser diverso como minimizar el número de vehículos necesario, o el coste del sistema al completo.

Uno de los problemas más utilizados en la literatura en el diseño de residuos sólidos, y base de este trabajo, es el problema VRP con restricciones de capacidad (CVRP, Capacitated Vehicle Routing Problem, Dantzig, Ramser, 1959). Posteriormente,

Finalmente, el problema que resuelve el diseño de rutas con la especificación de frecuencia de paso es planteado y demostrado que es un problema no computable en tiempo polinomial (NP-duro) ya que se asemeja al problema MVRPW (Múltiple vehicle routing problem with time Windows, Problema de diseño múltiples rutas con ventanas de tiempo) donde los métodos exactos no obtienen solución en tiempos razonables. El problema puede ser resuelto mediante técnicas heurísticas o bien técnicas meta-heurísticas tales como Algoritmos genéticos, Recocido Simulado, Búsqueda Tabú o Sistemas de hormigas.

3. Modelo de diseño de rutas

En el marco del siguiente trabajo la ciudad objeto de estudio se representa mediante un grafo dirigido $G(V,A)$. Los arcos del grafo corresponden con calles mientras que los vértices están asociados a las intersecciones entre calles. Los arcos representan el sentido de circulación, por lo que una calle de doble sentido dispondrá de dos arcos. Existe un solo depósito de donde parten y llegan los camiones recolectores, que se denotará por el índice 0.

Los residuos son depositados en contenedores que están situados en diferentes calles. Cada camión posee una capacidad medida en número de contenedores (C_k , se suponen que los

contenedores está completos), el tiempo empleado en recoger un contenedor es conocido (T_r) y el número de camiones disponibles es limitado (NC camiones). Así mismo un camión puede realizar varias rutas siempre y cuando haya completado el recorrido asignado y no supere el tiempo total de trabajo (T).

El modelo de programación lineal que resuelve el problema planteado sería:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{NC} v_k \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=1}^{NC} \sum_{t=1}^{NV} y_{ijkt} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n s_{ij} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{NC} \sum_{t=1}^{NV} s_{ij} y_{ijkt} = 1 \quad \forall i, j \mid s_{ij} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{t=1}^{NV} a_{ij} x_{ijkt} + T_r C_{ij} y_{ijkt} = v_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$v_k \leq T \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_{j \in S(0)} \sum_{k=1}^{NC} x_{0jkt} = 1 \quad \forall t = 1..NV \quad (6)$$

$$\sum_{i \in A(0)} \sum_{k=1}^{NC} x_{i0kt} = 1 \quad \forall t = 1..NV \quad (7)$$

$$\sum_{j \in S(i)} \sum_{k=1}^{NC} x_{ijkt} - \sum_{i \in P(j)} \sum_{k=1}^{NC} x_{ijkt} = 0 \quad \forall i = 1..n \quad \forall t = 1..NV \quad (8)$$

$$y_{ijkt} \leq x_{ijkt} \quad \forall i, j, k, t \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} S_{ij} y_{ijkt} \leq C_k \quad \forall k, t \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijkt} - n^2 z_s \leq |S| \quad \forall k, S \text{ subconjuntos de vértices} \quad (11)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S'} x_{ijkt} + u_{sk} \geq 1 \quad \forall k, S, S' \text{ subconjuntos de vértices} \quad (12)$$

$$u_{sk} + z_{sk} \leq 1 \quad S \text{ subconjuntos de vértices} \quad (13)$$

$$y_{ijkt}, x_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, t$$

$$v_k \geq 0 \quad \forall k$$

$$u_{sk}, y_{sk} \in \{0,1\} \quad \forall k$$

Donde a_{ij} es el coste/tiempo de viaje por la calle que conecta los vértices i y j , C_{ij} es empleado para indicar el número de contenedores en la calle que conecta el nodo i con el j . Los conjuntos $S(i)$ y $P(i)$ indican los nodos que suceden o preceden al nodo i . Las variables de decisión del problema hacen referencia al conjunto de calles que el camión recorre en cada viaje $x_{i,j,k,t} : 1$ si el camión circula por una calle e $y_{i,j,k,t} : 1$ si el camión recoge los contenedores de la calle, por último dos variables que recogen el tiempo de viaje de cada camión y el número de camiones que serán necesarios.

La obligatoriedad de recoger todos los residuos en contenedores viene fijada en la restricción 1, así mismo los contenedores solo podrán ser recogidos por un camión. La restricción (3) es empleada para calcular los tiempos de viaje de cada camión y estos no pueden ser superiores a las horas de trabajo. Las restricciones (4), (5) y (6) están fijadas para obtener la ruta de recogida y la restricción (7) fijan la imposibilidad de recoger contenedores por calles donde el camión no circula y la (8) imposibilita que se supere la capacidad de los camiones. La función objetivo es minimizar los tiempos de viaje totales.

Además se han añadido restricciones que permite eliminar subciclos no conexos aun permitiendo dos o más ciclos cerrados (restricciones 12, 13, 11) (Pereira, 2004).

Las restricciones de ciclo hacen que el problema sea no computable en tiempo polinomial, además de ser un problema semejante MVRPW el número de restricciones crece exponencialmente con el número de vértices del problema. La figura 1 muestra la evolución del tiempo de computación en la resolución del modelo para un ejemplo donde manteniendose el número de camiones, capacidades y contenedores se ha incrementado el número de vértices.

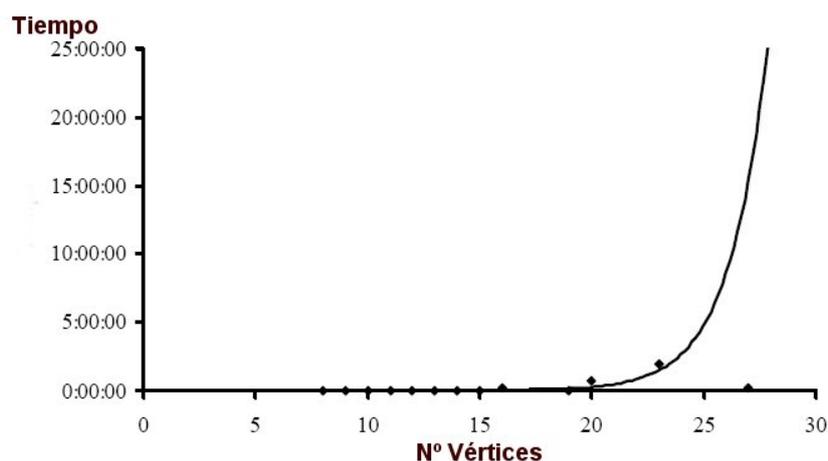


Figura 1. Tiempo de computación en función del número de vértices

4. Resultados

El modelo propuesto ha sido analizado en pequeñas redes para su resolución óptima. La figura 1 muestra un ejemplo de aplicación del modelo en la resolución del problema,

suponiendo que la distancia entre los arcos es la misma en ambas direcciones, el número de camiones es de 2 unidades con una capacidad de 4 contenedores cada uno que parten del nodo 1 y el número de contenedores junto con su situación viene dado en la tabla 1.

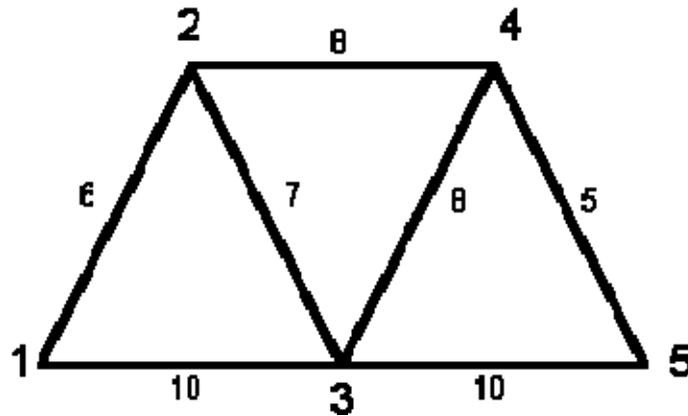


Figura 2. Grafo ejemplo de pruebas al modelo

Tabla 1. Últimos congresos de ADINGOR. Times New Roman, 10 puntos. (usar estilo 'Pie de imagen')

Vértice Origen	Vértice Destino	Nº Contenedores
2	4	2
4	3	2
5	4	3

El modelo ha sido resuelto mediante CPLEX y su resolución ha proporcionado proporcionalmente 2 rutas asignadas a los camiones de la siguiente forma:

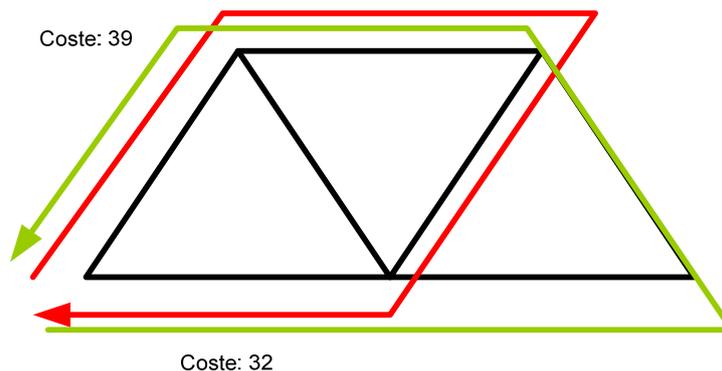


Figura 3. Grafo ejemplo resolución del modelo

Referencias

Bautista, J.; Pereira, J. (2004). "Ant Algorithms for Urban Waste Collection Routing". *Lecture Notes in Computer Science*, 3172:302-309.

- Campos, V.; Mota, E. (1995). "Metaheurísticos para el CVRP". *XXII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa*. Sevilla.
- Cordeau J.F., Gendreau M., Laporte G., Potvin J.Y., and Semet F. (2002). "A guide to vehicle routing heuristics". *JORS*, 53:512-522.
- Gendreau, M.; Hertz, A.; Laporte, G. (1991). "A Tabú Search Heuristic for Vehicle Routing Problem". *Management Sci.*, 40(10):1276-1290.
- Glover, F. (1989). "Tabú Search: Part I". *ORSA Journal on Computing*, 1:190-206.
- Kontoravdis, G.; Bard, J.F. (1995). "A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows". *ORSA Journal on Computing*, 7:10-23.
- Laporte, G. (1997). "Modeling and solving several classes of arc routing problems as travelling salesman problems". *Computers and Operations Research*, 24(11):1057-1061.
- Laporte, G.; Nobert, Y. (1983). "A branch and bound algorithm for the capacitated vehicle routing problem". *Operations Research Spektrum*, 5:77-85.
- Osman, I. (1993): "Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem". *Annals of Operations Research*, 41:421-451.
- Pereira, J (2004). *Modelización y resolución de problemas de diseño de sistemas de recogida de residuos urbanos*. Ph D.Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña