

Sistema DIRCE

Diseño de itinerarios para la recogida de residuos

Resultado de una colaboración entre el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOCSI) y el Institut Cerdà, DIRCE tiene como objetivo diseñar y elaborar las rutas que deben seguirse para recoger diferentes tipos de residuos generados en un conjunto de poblaciones. El punto de partida y de destino de cada ruta se localiza en una instalación central de tratamiento y el propósito es minimizar el tiempo total de operaciones.

El problema de diseño de rutas, es uno de los más difíciles en el campo de la optimización combinatoria. Tomando como ejemplo el famoso caso que se ha dado en llamar del viajante de comercio (hallar un circuito de coste mínimo que pase una vez, y una sola, por cada uno de un conjunto de puntos previamente especificados) considerado un problema "duro", el caso de la recogida de residuos, como muchos otros problemas análogos, es aún más difícil, puesto que se han de respetar las condiciones relativas a la capacidad de los vehículos y al tiempo de que disponen para llevar a cabo su cometido; ello, en general, obliga a establecer un conjunto de itinerarios y no uno solo (como en el problema del viajante de comercio).

Por supuesto, el problema ha sido estudiado por muchos investigadores y existen múltiples procedimientos para resolverlo, con mayor o menor aproximación y con más o menos tiempo de cálculo. Algunos de estos procedimientos se han incorporado a paquetes informáticos para el diseño de rutas, cuyo coste en general es bastante alto y cuya utilización exige un cierto período previo para el aprendizaje y la entrada de datos.

El paquete que se presenta en este trabajo se diseñó bajo la perspectiva de obtener un producto de coste relativamente bajo, fácil de utilizar, y con el fin de estimar el coste implicado en la recogida de

un cierto tipo de residuos en un área dada.

El problema concreto

A grandes rasgos, la situación a resolver es la siguiente: Se dispone de una sola instalación de tratamiento de un determinado tipo de residuo, y de un conjunto de poblaciones generadoras del mismo. Para cada población, incluida la que alberga la instalación de tratamiento, se conoce el volumen de los distintos tipos de residuos que genera en un periodo de tiempo establecido (un día, por ejemplo), la capacidad máxima de los vehículos (todos presentan la misma) que participan en la recogida, las coordenadas geográficas de las poblaciones, los tiempos mínimos de recorrido entre dichas poblaciones, el tiempo de descarga en la instalación de tratamiento y los tiempos asociados a la recogida en cada población; estos últimos son la agregación de tres componentes: el tiempo de recorrido de la periferia al centro de la población, el tiempo de descarga del contenedor de recogida y el tiempo entre contenedores. El tiempo total de recogida dentro de una población tiene en cuenta, pues, dichos tiempos y el número de contenedores existentes en ella.

Se trata, entonces, de diseñar un conjunto de itinerarios que respeten la limitación impuesta por la capacidad máxima de las cajas de los camiones que recogen los residuos

Objetivo: reducir costes

La recogida de residuos sólidos urbanos (RSU) es un proceso tradicional y de importancia económica creciente. Por una parte, por el mayor volumen de residuos que genera el crecimiento económico; por otra, por la creciente sensibilidad medioambiental, que lleva a reciclar una proporción cada vez mayor de residuos, lo cual exige su previa clasificación y recogida selectiva. Este nuevo tipo de gestión, impuesto a su vez por la publicación de nuevas normativas, hace necesaria una nueva planificación de la recogida, transporte y tratamiento de las fracciones de RSU en contraposición con su gestión clásica o en masa. La recogida selectiva implica el manejo de menores cantidades de residuos, pero de una mayor variedad, que dependerá del tipo de sistema de recogida (así pues, se podría llegar a recoger por separado vidrio, papel/cartón, envases ligeros, materia orgánica y resto). Ello conlleva que el modelo de recogida en masa, realizada hasta el momento mayoritariamente en el ámbito municipal, no sea el más idóneo económicamente para la recogida selectiva, y deba proponerse una recogida selectiva mancomunada más racional que disminuya los costes de la gestión. Dicha recogida implica el diseño de rutas.



La reducción de los costes de gestión interesa a la administración y a los ciudadanos, que son quienes en definitiva los pagan; pero también, por supuesto, a las empresas que llevan a cabo la recogida, las cuales desean dar el nivel de servicio requerido al mínimo coste posible.

Los costes de la gestión de los RSU son la suma de sus costes de recogida, transporte, tratamiento y disposición. Por ello, uno de los aspectos que tiene influencia en el coste total de gestión de los residuos es el tiempo de recogida y transporte, del que depende el diseño de las rutas de los vehículos, atendiendo al planteamiento de la recogida mancomunada. Asimismo, los costes de tratamiento de los residuos también son importantes y deben considerarse las economías de escala que se pueden conseguir. La optimización de los costes totales obliga al planteamiento de diferentes zonificaciones del territorio para los que se calculan los costes de recogida, transporte y tratamiento. Al final se escoge la zonificación que supone unos menores costes de gestión. Esta es la filosofía básica de los Programas de Gestión Integrada de RSU realizados para nueve comunidades autónomas.

y por el tiempo de una jornada laboral (del orden de 8 horas). Como primer objetivo se pretende minimizar el tiempo total requerido para efectuar el servicio completo de recogida y minimizar su coste; como objetivo secundario se desea que el número de rutas y, por tanto, de vehículos destinados a ofrecer este servicio, sea mínimo.

Concepción del sistema DIRCE

El sistema DIRCE (*Disseny d'Itineraris per a la ReCollida d'Escombraries*) debía cumplir los siguientes requisitos:

- Servir como instrumento para diseñar itinerarios limitados en carga y tiempo, con el propósito de mini-

mizar el tiempo total operativo, y ofrecer resultados en breve tiempo ante la necesidad de realizar explotaciones masivas del sistema asociadas a diferentes hipótesis de trabajo sobre distintas regiones geográficas.

- Ser ejecutable en entorno PC y susceptible de futuras ampliaciones y mejoras relativas a su convivialidad con el usuario.
- Ofrecer la información necesaria y suficiente para representar los itinerarios mediante un sistema de información gráfico.

Por ello se optó por incorporar al sistema procedimientos heurísticos que ofrecen soluciones de calidad en tiempos aceptables. DIRCE se

programó en VB para que fuera fácil su incorporación en entorno Windows. Se aprovecharon las ventajas de éste y se redujo al mínimo el trabajo de construcción de interfaces cuyo aspecto y exigencia de prestaciones son fuertemente dependientes del usuario final. El trabajo se centró en el diseño, construcción y refinamiento de algoritmos (motor del sistema). Las soluciones que genera DIRCE00 se guardan en ficheros con formato adecuado a un sistema de información gráfico.

Los datos que se precisan

Las informaciones requeridas por DIRCE se estructuran en tres fiche-

L

D

T

334 / FEBRERO 1999

ros, a saber: coordenadas, cargas y tiempos. Se requiere también el tiempo de descarga y el tiempo límite en ruta.

El fichero de coordenadas contiene las informaciones relativas a: (1) los códigos de las poblaciones, (2)

la longitud expresada en grados (meridiano) de cada población, (3) la latitud expresada en grados (paralelo) de cada población, y (4) el status de la población que puede adoptar los valores: [0] inactiva, [1] activa y [-1] depósito de descarga.

Por su parte, el fichero de cargas

añade las informaciones relativas a: (1) volumen de residuo en tanto por 1 respecto a la capacidad del vehículo, generado en cada población en la unidad de tiempo preestablecida, (2) tiempo necesario (en minutos) para que un vehículo se desplace de la periferia al centro de la

Explotación del sistema

Arranque del programa

Una vez ejecutado el programa DIRCE.EXE, desde MS-DOS y desde el directorio donde se halla el programa, se solicitará el conjunto de informaciones mostradas en la figura.

Los nombres de los ficheros de cargas, coordenadas y tiempos deben escribirse completos y con su extensión (ejemplo: murdato.dat, murco.dat y murtem.dat).

Para los ficheros .SOL, que contienen las cuatro soluciones en modalidad abreviada, se solicitará un prefijo de 6 caracteres como máximo (ejemplo: mur) al que añadirá el programa, de forma automática, el número de algoritmo asociado a la solución y la extensión .SOL (para el ejemplo, se generarán los ficheros: mur01.sol, mur02.sol, mur03.sol y mur04.sol).

Para el fichero .INF, que contiene las cuatro soluciones en modalidad informe, se solicita un nombre de 8 caracteres como máximo (ejemplo: mur); a este nombre, el programa añadirá, de manera automática, la extensión .INF (para el ejemplo, se generará el fichero mur.inf).

Si se desea guardar las soluciones, en ambas modalidades, en un subdirectorío del directorio donde se encuentra el programa DIRCE.EXE, bastará obrar de la siguiente forma:

- (1) Antes de ejecutar el programa se debe crear dicho subdirectorío.
- (2) Cuando se solicite el nombre del "Directorio de salida existente :", se deberá escribir el nombre de dicho subdirectorío. Si se omite esta información (se deja en blanco), el programa generará los ficheros de soluciones sobre el directorio donde se halle DIRCE.EXE.

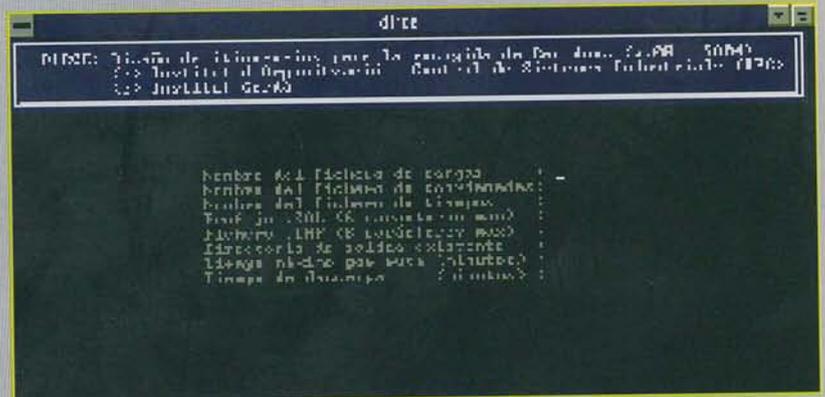
El resto de informaciones solicitadas son numéricas. En primer lugar se debe introducir el "Tiempo máximo por ruta minutos:", un valor estándar es 480 minutos (jornada de 8 horas); seguidamente, se pide "Tiempo de descarga minutos:", en este caso, un valor estándar es 15 minutos. Si alguno de estos datos se omite, el programa interpretará que el tiempo correspondiente adopta el valor 0.

Tras introducir las informaciones que se solicitan, se pedirá la confirmación de éstas. Si la respuesta es negativa, el programa solicitará de nuevo todas las informaciones. Si la respuesta es positiva y todas las informaciones son correctas, el programa pasará a la lectura de ficheros y a ejecutar los algoritmos.

Ejecución

La ejecución se divide en 6 fases, como puede verse en la figura. Concretamente:

- Fase 0: Se inicia el proceso con la lectura de los ficheros de carga, coordenadas y tiempos.
- Fase 1: Se determinan y ordenan los ahorros entre cada par de poblaciones. El ahorro entre un par de poblaciones representa la diferencia de tiempos entre dos alternativas: (i) viaje de ida y vuelta desde el depósito de descarga hasta cada población de manera individual, y (ii) ruta más rápida, con ori-



Pantalla donde se solicita de informaciones requeridas por el programa DIRCE.

población y (3) tiempo necesario (en minutos) para recoger los contenedores y compactar la carga asociada a cada población.

Finalmente, el fichero de tiempos interurbanos es una matriz de transporte simétrica que contiene el tiempo mínimo (en minutos) que

tarda un vehículo en desplazarse entre las periferias de todo par de poblaciones, y que tiene en cuenta el tipo de vehículo y de carretera transitada.

A los datos anteriores, el usuario debe añadir el tiempo necesario para realizar la descarga de residuos

en el depósito, después de completar la ruta, y el tiempo máximo permitido para realizar las operaciones de cada ruta: desplazamientos, recogidas y descargas.

Los procedimientos

Para el diseño de itinerarios en ca-



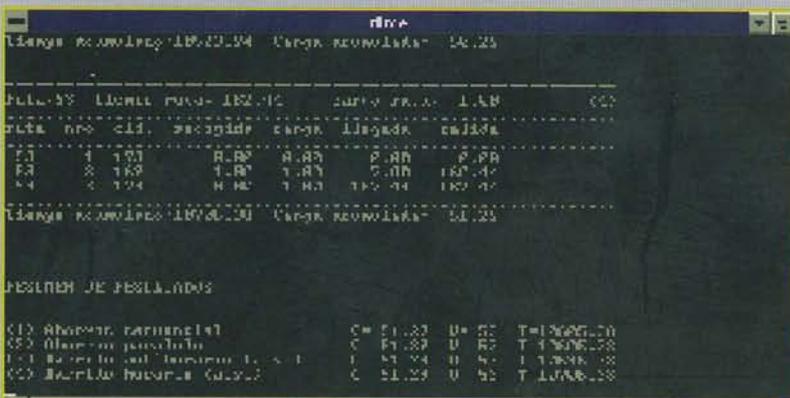
Presentación de las fases de ejecución desarrolladas por el programa DIRCE.

miento de las agujas del reloj.

• Fase 5: Ejecución, para cada población (obsérvese que en el ejemplo hay 36 poblaciones), del algoritmo de barrido con desplazamiento angular en sentido horario.

Una vez concluido el proceso, se solicita visualizar el informe generado o finalizar la sesión.

Visualizar el informe



Visualización del informe sobre los itinerarios diseñados por el programa DIRCE.

los cuatro procedimientos descritos. Lógicamente se escoge el de menor tiempo. Los costes anuales de recogida y transporte se calcularán a partir del tiempo obtenido del DIRCE, el número de periodos de recogida anuales y los costes por unidad de tiempo (por ejemplo, ptas/h) de personal, amortización y mantenimiento de los camiones de recogida.

gen y destino en el depósito de descarga, que pasa por las dos poblaciones consideradas.

- Fase 2: Ejecución del algoritmo de ahorros con construcción en serie de los itinerarios.
- Fase 3: Ejecución del algoritmo de ahorros con construcción en paralelo de los itinerarios
- Fase 4: Ejecución, para cada población (obsérvese que en el ejemplo hay 36 poblaciones), del algoritmo de barrido con desplazamiento angular en sentido contrario al movi-

L

D

T

(1) Ahorros secuencial $C = 30.87$ $V = 34$ $T = 8882.96$

Ruta:1 tiempo ruta: 439.07 carga ruta: 0.96 (1)

ruta	nro	cli.	recogida	carga	llegada	salida
1	1	34	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2	15	0.19	0.19	30.00	63.58
1	3	5	0.07	0.26	79.58	93.57
1	4	1	0.09	0.35	125.57	179.07
1	5	19	0.56	0.91	184.07	286.57
1	6	26	0.05	0.96	296.57	343.07
1	7	34	0.00	0.96	394.07	439.07

Tiempo acumulado: 439.07 Carga acumulada: 0.96

Aspecto del informe sobre los itinerarios diseñados por el programa DIRCE.

da explotación se emplean los siguientes procedimientos:

- Algoritmo de ahorros de construcción de itinerarios, en serie y en paralelo. Las rutas resultantes se someten a un procedimiento de optimización local.

- Algoritmo de barrido ejecutado, en sentido horario y antihorario, partiendo desde todas las poblaciones. Los itinerarios para cada agrupación resultante se obtienen mediante un procedimiento heurístico de ahorros (construcción serie) con posterior mejora. En ambas versiones (sentidos horario y antihorario), se selecciona una solución que presente el menor tiempo total.

Los resultados

DIRCE ofrece cuatro soluciones en cada explotación, y son las referentes a la aplicación de: (1) algoritmo de ahorros construcción serie, (2) algoritmo de ahorros construcción

paralelo, (3) algoritmo de barrido antihorario (con inicio en cada población) y (4) algoritmo de barrido horario (con inicio en cada población)

Las soluciones se presentan en dos modalidades: informe y solución abreviada.

En la figura 1 se muestra el aspecto del informe donde se describe, para cada procedimiento, el volumen total de recogida (C), el número de rutas (V) y el tiempo requerido para realizar todas las operaciones (T).

Se indica, para cada ruta, el tiempo, el volumen de recogida y el algoritmo aplicado; tras ello, se pasa a la descripción detallada de la ruta, con la ayuda de los conceptos:

- ruta: número de ruta
- nro: orden de la población en la ruta
- cli: código de la población
- recogida: volumen de residuo recogido en la población
- carga: volumen acumulado de residuo hasta la población (se incluye)
- llegada: instante relativo de llegada a la población (en minutos)
- salida: instante relativo de salida de la población en minutos)

Finalmente se indica el tiempo y carga acumulada desde la primera ruta hasta la consultada.

La solución abreviada se presen-



ta en cuatro ficheros, en relación con los cuatro procedimientos aplicados. Cada fichero contiene las informaciones referentes a:

- (1) número de la ruta,
- (2) orden de la población en la ruta,
- (3) código de la población,
- (4) longitud expresada en grados (meridiano),
- (5) latitud expresada en grados (paralelo) y
- (6) volumen de residuo recogido en la población.

Una explotación exitosa

DIRCE se ha explotado con éxito para calcular los costes de recogida selectiva y transporte de RSU y de envases y de residuos de envases en diversas zonas geográficas y nueve comunidades autónomas: Rioja, Navarra, Valencia, Murcia, Cataluña, Castilla la Mancha y Castilla León, Aragón e islas Baleares (Mallorca y Menorca). Dichos cálculos han contribuido a la elaboración de los correspondientes Programas de Gestión Integrada de Residuos, que planifican la nueva gestión de residuos en dichas comunidades autónomas. En la actualidad se están estudiando diversas ofertas en otras zonas geográficas.

Joaquín Bautista y Albert Corominas, Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (www.ioc.upc.es), Ramón Companys, Laboratori d'Organització Industrial ETS d'Enginyers Industrials de Barcelona (www.etseib.upc.es), Manel Arias, Institut Cerdà (www.icerda.es)

Bibliografía

- Bramel, J., Simchi-Levi, D., *The logic of logistics*. Springer, 1998.
- Companys, R., Corominas, A., *Organización de la producción II. Dirección de operaciones 5*. Edicions UPC, 1996.