

## Optimização de Rotas: Aplicação à Recolha de Lixo do Concelho de Viseu

**ANA CRISTINA BICO MATOS**

Departamento de Matemática,  
Escola Superior de Tecnologia de Viseu

### Introdução

A sessão apresentada no âmbito das comemorações do Ana Mundial da Matemática, abordou o problema de organização do sistema de recolha de resíduos sólidos municipais do concelho de Viseu.

A recolha de resíduos sólidos nos arredores de Viseu e na zona rural do concelho é executada pelos Serviços Municipalizados da Câmara Municipal de Viseu e efectuava-se em moldes que não serviam, nem a população abrangida, nem os funcionários da Câmara. Foi então desenvolvido um sistema de planeamento das rotas semanais ou diárias e definição do calendário das visitas a cada local, de modo a melhorar significativamente a situação então em vigor.

### O caso de estudo

Não sendo sentidas dificuldades na recolha dos lixos domésticos do centro da cidade (que é efectuada durante a noite), foi dado ênfase à recolha dos arredores da cidade e das aldeias de todo o concelho, que é feita durante o dia, pois é aí que é sentido um elevado esforço económico, assim como algumas deficiências quanto aos padrões de serviço (limpeza).

Na área em estudo, e na data do mesmo, encontravam-se distribuídos 1464 contentores de 1100 litros, pelas 34 freguesias do concelho. Eram despejados com

diferente periodicidade, alguns despejados diariamente , enquanto outros, três, duas ou até uma vez por semana.

A área em estudo estava dividida em cinco zonas distintas. Cada zona, designada por giro, é constituída por vários locais de recolha. Cada giro ficava afecto a uma equipa de trabalho (composta por um motorista, dois cantoneiros e uma viatura de recolha) durante um mês, ficando responsável pela recolha e transporte do lixo dessa zona. A periodicidade de recolha ficava ao critério da equipa, pois supõe-se que a mesma conhece todos os pontos de recolha, assim como as quantidades de lixo produzidas (o conhecimento destas é inferido a partir da prática diária, havendo a noção do tempo que os contentores demoram a encher).

Assim, todos os dias úteis de manhã, os motoristas partem da garagem e deslocam-se até Viseu onde se encontram os cantoneiros. Daqui seguem para a recolha do lixo nas localidades pertencentes ao giro que lhes é afecto, sendo a escolha da rota a seguir da exclusiva responsabilidade da equipa.

Pelo fim da manhã, interrompem a recolha e dirigem-se ao aterro sanitário (localizado a 6,5 km de Viseu) onde a carga dos veículos é pesada e despejada. O turno da tarde repete a rotina da manhã e retoma a recolha, tipicamente, no ponto do plano de recolha onde foi interrompido para o almoço.

Um planeamento da recolha e transporte dos resíduos sólidos urbanos é crucial, pois, se por um lado, existem limitações de equipamento e mão-de-obra, por outro, temos encargos significativos com consumíveis, manutenção dos veículos e mão-de-obra. Pequenos melhoramentos no transporte e recolha têm um impacto relevante na economia do processo e, eventualmente, na melhoria do serviço prestado.

Assim, com vista a obter um certo padrão de limpeza, manter a força de trabalho motivada e manter ou baixar, se possível, os custos de operação, os objectivos a conseguir na operação de planeamento do sistema de remoção em estudo, são:

- Planear as rotas a efectuar diariamente, por cada giro, em cada um dos cinco dias úteis, minimizando a distância total percorrida e satisfazendo as necessidades de recolha semanais em cada localidade, as restrições de capacidade dos veículos e de tempo por rota;
- Quantificar o custo da divisão do concelho em giros, planeando as rotas a efectuar diariamente para os dias da semana sem impor aquela divisão geográfica rígida e, portanto, adoptando outra forma de organizar a recolha.

### **O Modelo utilizado**

Para a construção das rotas dos veículos de recolha desenvolveu-se e implementou-se uma heurística baseada no conceito de poupança ("savings") introduzida originalmente por Clark & Wright. Houve a necessidade de adaptar esta heurística a este caso particular pois havia alguns pormenores que o distinguiam do problema abordado na literatura. Para maiores detalhes ver A. Matos, 1996.

O método foi adaptado ao facto da localidade (adiante designado por nó, ou ponto) de origem não coincidir com o nó destino, e introduziu-se uma restrição de distância máxima entre os nós para o cálculo das poupanças. A introdução deste parâmetro, cuja variação permite obter soluções diferenciadas (o que permite escolher a melhor solução), revelou-se mais atraente do que outras formas parametrizadas de cálculo das poupanças que foram ensaiadas.

A periodicidade da visita aos pontos de recolha foi outro factor a ter em conta na modelação do problema em estudo. Existem contentores que é necessário despejar diariamente, enquanto que para outros se torna suficiente uma única recolha semanal. Estamos, então, na presença de nós cuja periodicidade de recolha varia entre 5 dias por

semana a uma única visita semanal. Através da implementação de nós (pontos de recolha) artificiais (réplicas dos nós iniciais), criaram-se as rotas e afectaram-se posteriormente aos diferentes dias de semana. Este procedimento tem por base as propostas por Beltrami e Bodin (1974).

Para a implementação do modelo foram estimados alguns parâmetros do qual se destacam:

- Da análise dos inquéritos preenchidos pelas equipas de recolha foi possível identificar 222 **lugares de recolha**, entre os quais era necessário uma viagem pequena, mas significativa. São estes lugares que vão ser considerados os pontos a visitar, englobando, cada ponto de visita, um determinado número de contentores a recolher, dependendo da zona que se trata.

Existem situações extremas: nós com um único contentor a recolher, tipicamente caracterizado pela pequena aldeia quase isolada com pouco mais de 30 habitantes; ou nós com mais de 20 contentores, principalmente os bairros dos arredores da cidade com uma forte densidade populacional.

Sendo assim, para modelação do caso de estudo, há necessidade de atender às características de cada ponto de recolha, nomeadamente: a quantidade de lixo produzido por nó e o respectivo tempo de atendimento que corresponderá ao tempo despendido em cada zona com a recolha dos contentores aí existentes.

Cada cliente tem associado um tempo de atendimento, que corresponde ao tempo gasto com a visita e recolha dos contentores afectos ao nó. O tempo gasto em cada localidade e bairro ( $T_R$  - tempo de recolha) é um dado obtido a partir dos inquéritos, o mesmo acontecendo com o número de contentores existentes em cada zona (NCONT).

A forte correlação entre a variável  $T_R$ , e a variável NCONT, sugere o recurso a um modelo de regressão linear na forma:  $T_R = 1.843 \times$  NCONT a que corresponde um coeficiente de correlação  $r = 0.97$ .

- Foi necessário conhecer a **quantidade de lixo** recolhido em cada localidade. Esta quantidade dependerá, efectivamente, da periodicidade da recolha e de outros factores, tais como a população.

A estimação da quantidade de lixo recolhido semanalmente fez-se através da análise dos dados obtidos dos inquéritos e das pesagens dos camiões, usando o modelo de regressão linear que melhor se ajustou, estimando-se que:

Quantidade de lixo recolhido  
semanalmente na localidade  $i$  =  $3.87 \text{ kg} \times$  População da localidade  $i$

- Estimaram-se os **custos de operação dos veículos**, com base nos registos históricos de manutenção e reparação dos veículos, cobrindo um período de três anos, 1992 a 1994.

A despesa média por quilómetro percorrido foi estimada em 16\$85 para a manutenção e 15\$85 para a reparação. O consumo médio foi estimado em 49 litros/100 km:

$$\begin{aligned} \text{Custos Totais Médios} &= 16\$85 + 15\$89 + 0.49 \times 130\$00 \\ \text{(por km percorrido)} & \quad \text{(Manutenção)} \quad \text{(Reparação)} \quad \text{(Combustível)} \\ &= \mathbf{96\$44/ Km} \end{aligned}$$

É de salientar que devido ao facto de os trabalhos de manutenção e alguns trabalhos de reparação serem elaborados numa garagem pertencente à Câmara Municipal de Viseu, as despesas de mão-de-obra não foram consideradas, mas a serem contabilizadas, teriam um peso bastante significativo. Deste modo, a estimativa acima custo por quilómetro percorrido, peca por defeito.

- Também foram quantificados os quilómetros percorridos por rota, recorrendo a uma matriz de distâncias que continha a menor distância entre quaisquer duas localidades a visitar.

### **Apresentação de resultados**

Os modelos elaborados foram então utilizados para analisar o sistema em estudo para três cenários:

A) Mantendo o esquema organizativo actual com a divisão do concelho por "giros", e as frequência de recolha que a CMV indicou praticar actualmente.

Este cenário torna-se interessante caso se pretenda continuar com o sistema organizativo actual, isto é, com o concelho dividido em giros.

Após vários ensaios, onde se fez variar a distância máxima permitida entre os nós, para cada giro selecciona-se a melhor solução constituída por 10 rotas (duas por dia, durante 5 dias da semana), após o qual é necessário afectá-las aos diferentes dias da semana. O Quadro 1 sintetiza os resultados deste estudo:

	<b>SITUAÇÃO</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>HEURÍSTICA</b>
	<b>ACTUAL</b>	<b>Da Distância</b>	<b>Tempo</b>
GIRO 1	382 km	369 km (-3.6%)	1700 min
GIRO 2	389 km	342 km (-12%)	1653 min
GIRO 3	482 km	436 km (-9.5%)	1514 min
GIRO 4	525 km	482 km (-8.2%)	1483 min
GIRO 5	536 km	491 km (-8.4%)	1584 min
<b>TOTAL</b>	<b>2314 km</b>	<b>2117 km (-8,4%)</b>	

Para a afectação das rotas às equipas e aos dias da semana construiu-se um grafo em que os nós representam as rotas. As rotas  $i, j$  estão ligadas por um arco  $(i, j)$  quando têm um ponto de recolha comum. Assim, a existência de um arco  $(i, j)$  indica-nos a impossibilidade de, num determinado dia, se efectuarem as rotas  $i$  e  $j$ , pois se tal acontecesse estaríamos a visitar duas vezes o mesmo local, num mesmo dia.

Deve-se ter uma atenção especial aos pontos de recolha com duas únicas visitas semanais, pois as recolhas destes locais devem ser efectuadas em dias não consecutivos. Assim, diferenciaram-se as ligações a tracejado que correspondem a rotas que têm pelo menos um nó comum com duas únicas visitas semanais. Numa posterior afectação estas rotas deverão aparecer em dias não consecutivos.

As soluções obtidas representam uma redução de cerca de 8,5% da distância total percorrida actualmente pelos veículos. No entanto, julga-se que as melhorias associadas à solução proposta terão outra expressão real, pois suspeita-se que, pelo

menos em algumas zonas, a frequência real de recolha seja inferior à indicada pela CMV, e que, noutros casos, não sejam despejados todos os contentores quando da visita a algumas localidades.

**B) Abandonando a divisão do concelho por giros, mas mantendo a frequência de recolha indicada pela CMV.**

Analisando o problema na sua globalidade, isto é, não dividindo o concelho em zonas distintas e independentes, chegou-se à conclusão que se obteriam poupanças significativas:

- 50 rotas (5 veículos em 5 dias da semana com dois turnos diários) para um limite de tempo permitido por rota de 2h 54 m.
- 2096 Quilómetros percorridos em 7976 min  $\Rightarrow$  menos 218 Km (redução de 10% relativamente à situação actual)

a que estará associada uma redução de encargos anuais estimada em cerca de 1100contos (excluindo encargos com mão- -de-obra da manutenção). Pelas razões atrás apresentadas julga-se que estas melhorias estão subavaliadas.

Foram organizados cinco planos de trabalho, constituídos por um conjunto de 10 rotas, a serem executados semanalmente, um por cada equipa existente. Estes planos diferem dos giros na sua exclusividade, isto é, cada equipa fica afectada a um conjunto de localidades, embora possa haver pontos cuja recolha não seja exclusiva, pois pode ser efectuada por mais que uma equipa, embora em dias distintos.

Por comparação com os resultados obtidos para o cenário A, conclui-se que a imposição da divisão do concelho em "giros" não é muito penalizante, muito embora o abandono deste esquema organizativo permita uma distribuição mais equilibrada das cargas de trabalho entre as diversas equipas.

**C) Ajustando a frequência da recolha às estimativas das quantidades de lixo produzidas em cada localidade.**



Concluiu-se atrás que a quantidade de lixo recolhido semanalmente em cada localidade, podia ser explicada através da população aí residente pela expressão:

$$\text{Quantidade de lixo recolhido semanalmente (i)} = 3,87 \text{ Kg} \times \text{População (i)}$$

Através da massa volúmica dos resíduos sólidos,  $130 \text{ Kg/m}^3$  (Freeman, 1988), e do número de contentores existentes na localidade (i), é possível determinar a frequência, de visita de cada localidade.

Assim, após algumas alterações, é apresentada uma proposta para o planeamento semanal da recolha dos lixos comunitários, com uma periodicidade de visita diferente em alguns dos nós, visando um melhor padrão de limpeza. Obtêm-se, após várias simulações, onde se fazem variar a distância máxima permitida entre os nós, 50 rotas para limite de tempo permitido por rota de 3 horas, onde são percorridos 2283 quilómetros em 8280 minutos  $\Rightarrow$  menos 31 Km  $\Rightarrow$  inexistência de custos adicionais.

As soluções obtidas, não dividindo o concelho por giros, são equivalentes (em termos de distância percorrida) à solução actualmente adoptada, mas julga-se que corresponderia a melhorar significativamente os padrões de serviço prestado, ao aumentar a frequência de recolha nas zonas onde se estima ser mais elevada a produção de lixo, e portanto, mais se fazem sentir os problemas ambientais resultantes de uma deficiente periodicidade de visita.

### **Conclusões**

Para a construção das rotas dos veículos de recolha desenvolveu-se e implementou-se uma heurística baseada no conceito de poupança ("savings") introduzida originalmente por Clark & Wright. O método foi adaptado às particularidades da situação estudada.

Foram delineadas as rotas semanais de cada giro e sua afectação aos diferentes dias da semana, para o caso de se pretender continuar com o sistema de giros. A frequência de visita considerada para cada localidade foi a que se encontra em vigor. Como verificámos, alguns giros podem sofrer melhorias significativas.

Foi abordado um outro cenário, onde se analisa o problema na sua globalidade, isto é, não dividindo o concelho em zonas distintas e independentes, tendo-se obtido poupanças significativas. Esta metodologia difere dos giros na sua exclusividade, isto é, cada equipa fica afecta a um conjunto de localidades, embora possa haver pontos cuja recolha não seja exclusiva, pois pode ser efectuada por mais que uma equipa, embora em dias distintos.

Finalmente, foi analisada a periodicidade de visita a cada localidade com recolha. Após algumas alterações foi apresentada uma proposta para o planeamento semanal da recolha dos lixos comunitários, com uma periodicidade de visita diferente em alguns dos nós, visando um melhor padrão de limpeza, sem custos adicionais.

#### **Bibliografia:**

- [1] BELTRAMI, E. and BODIN, L.D. - Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, vol. 4, nº 1, 1974, pp. 65-94.
- [2] BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A. and BALL, M. - Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers and Operations Research*, vol. 10, 1983, pp. 63-212.
- [3] CLARK, G. and WRIGHT, J.W. - Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, vol. 12, 1964, pp. 568-581.
- [4] MATOS, A.- Optimização de um Sistema de Recolha de Resíduos Sólidos - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas, 1996.
- [5] PAESSENS, H. - The savings algorithm for the vehicle routing problem. *European Journal and Operations Research*, vol. 34, 1988, pp. 336-344.