



**SCHOOL OF
ECONOMICS &
MANAGEMENT
LISBON**

**MESTRADO EM
DECISÃO ECONÓMICA EMPRESARIAL**

**TRABALHO FINAL DE MESTRADO
TRABALHO DE PROJETO**

**PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DE CIRCUITOS DE
RECOLHA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA
CÂMARA MUNICIPAL DE OEIRAS**

RICARDO JORGE ALVES FORTUNATO

ORIENTAÇÃO:

**DRA. MARIA CÂNDIDA VERGUEIRO MONTEIRO CIDADE
MOURÃO**

SETEMBRO-2013

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora, Dra. Maria Cândida Vergueiro Monteiro Cidade Mourão, pela disponibilidade demonstrada para o desenvolvimento da investigação.

Agradeço à Câmara Municipal de Oeiras pela sua flexibilidade em ajudar com a disponibilização de dados, especialmente a Dra. Ana Monteiro e a Eng.^a Carla Estevez.

Um grande obrigado à minha família e amigos pelo apoio prestado, pois foram um apoio grande durante esta investigação.

Agradeço também à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), pela bolsa concedida através do projeto PTDC/EGE-GES/121406/2010. Um último agradecimento ao Instituto Superior de Economia e Gestão (ISEG) pelo apoio e ajuda na colaboração com a Câmara Municipal de Oeiras.

Resumo

O estudo tem como objetivo, através da parceria com a Câmara Municipal de Oeiras (CMO), determinar circuitos de recolha de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) indiferenciados, melhorando, se possível, os tempos de recolha atuais.

O Decreto-Lei n.º 178/2006 (do Diário da República, 1.ª série – n.º 171— 5 de Setembro de 2006) define a recolha de RSU como uma operação de recolha de resíduos com vista ao seu transporte. Esta é executada em horários pré-estabelecidos, com periodicidade variável consoante a capacidade dos veículos e das suas características bem como das características dos resíduos e do meio envolvente (rural/ urbano).

Empiricamente, o problema enquadra-se num problema de roteamento de veículos (“*Vehicle Routing Problem*” (VRP)) pelo facto de ser um problema de procura nos vértices, com restrição de capacidade. Os vértices representam os pontos de recolha que se encontram em cruzamentos ou pracetas. A dimensão do Concelho de Oeiras, levou a uma abordagem do tipo “*cluster-first, route-second*”, subdividindo o concelho em partes homogéneas para uma formalização mais compacta e de mais rápida resolução.

Atendendo à informação disponibilizada e à análise dos resultados obtidos, após o tratamento realizado aos dados, foram obtidos resultados positivos. Estes parecem traduzir uma melhoria na ordem dos 10% na distância total percorrida numa semana e em 13% no tempo total despendido.

Palavras-chave: Problema de roteamento de veículos, Câmara Municipal de Oeiras, Problema de determinação de circuitos de recolha de resíduos sólidos urbanos.

Abstract

The study aims, through a partnership with Câmara Municipal de Oeiras (CMO) to determine collection circuits of undifferentiated solid waste, improving, if possible, the time of the current collection circuit.

The Law DL n.º 178/2006 (of the Diário da República, 1.ª série – n.º 171— 5th of September 2006) defines the collection of undifferentiated solid waste as a gathering of waste in order to its transport. This is performed at pre-defined intervals with variable periodicity depending on the vehicles capacity and type, as well as the waste and environment types (rural / urban).

Empirically, the problem relates to a Vehicle Routing Problem (VRP) because demands are located on the vertices, with a vehicle capacity constraint and where the vertices (alleys or intersections) represent collection points. Due to the size of the refuse instances in Câmara de Oeiras, a “cluster-first, route-second” approach was adopted, which starts by subdividing the county in homogeneous parts to obtain a more compact and faster model.

Therefore, given the available information and a preliminary treatment of the data, it seems that if compared to actual circuits, positive results were found. In fact an improvement of around 10% in the total distance traveled and of 13% in the total time spent was achieved.

Key-words: *vehicle routing problem, Câmara Municipal de Oeiras, determination of the circuit collection solid waste problem.*

Índice

Capítulo 1.	Introdução	8
Capítulo 2.	Contextualização do PCRSU - CMO.....	11
2.1.	<i>Introdução</i>	11
2.2.	<i>Problemas com Procura nos Vértices e nos Arcos</i>	12
2.2.1.	<i>Introdução</i>	12
2.2.2.	<i>Caixeiro-Viajante – TSP</i>	13
2.2.3.	<i>Problema do Carteiro Chinês - CPP</i>	13
2.3.	<i>Problemas com Restrição de Capacidade</i>	14
2.3.1.	<i>Introdução</i>	14
2.3.2.	<i>Problemas com Procura nas Arestas e Restrições de Capacidade – CARP</i>	14
2.3.3.	<i>Problemas com Procura nos Vértices e Restrições de Capacidade – VRP</i>	16
Capítulo 3.	Funcionamento de Recolha de Resíduos na CMO	20
Capítulo 4.	Metodologia de Investigação	24
Capítulo 5.	Definição e Formalização do PCRSU-CMO	30
5.1.	<i>Definição e Notação do PCRSU-CMO</i>	30
5.2.	<i>Formalização do PCRSU-CMO</i>	32
5.2.1.	<i>Modelo 1 - Circuitos nos Super Nodos (Clusters)</i>	34
5.2.2.	<i>Modelo 2- Circuitos dentro de cada cluster</i>	35

Capítulo 6.	Discussão de Resultados	37
Capítulo 7.	Conclusão.....	43
	Bibliografia	45
	Anexo	49

Índice de Figuras

FIGURA 1 - PONTES DE KÖNIGSBERG	11
FIGURA 2 – DEPÓSITOS DE RECOLHA	21
FIGURA 3 – CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA TRATOLIXO, S.A.	22
FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DA TRATOLIXO	23
FIGURA 5 - CIRCUITO OTIMIZADO DE SÁBADO DO <i>CLUSTER</i> /FREGUESIA DE ALGÉS	29
FIGURA 6 - CIRCUITOS ATUAIS (SEGUNDA-FEIRA)	40
FIGURA 7 - CIRCUITOS OTIMIZADOS (SEGUNDA-FEIRA)	41
FIGURA 8- CONSTITUIÇÃO DOS PONTOS DE RECOLHA POR <i>CLUSTERS</i>	51
FIGURA 9 - CONSTITUIÇÃO DOS PONTOS DE RECOLHA POR <i>CLUSTERS</i>	52

Índice de Tabelas

TABELA I - TEMPOS DISPONÍVEIS (EM HORAS) PARA EXECUÇÃO DE TAREFA.....	39
TABELA II - TEMPOS DIÁRIOS (EM HORAS) DE RECOLHA OTIMIZADOS	39
TABELA III - TEMPO (EM HORAS) PERCORRIDO.....	40
TABELA IV - DISTÂNCIA (EM METROS) PERCORRIDA	411
TABELA V –DIFERENÇA DAS DISTÂNCIAS (EM METROS) PERCORRIDA POR CADA VEÍCULO.....	42
TABELA VI - CONSTITUIÇÃO DOS PONTOS DE RECOLHA POR <i>CLUSTERS</i>	499

Capítulo 1. Introdução

O presente estudo tem como objetivo determinar circuitos para a recolha de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) indiferenciados que venham a melhorar os tempos de recolha atuais na Câmara Municipal de Oeiras (CMO). Para tal, formula-se um Problema de determinação de Circuitos de recolha de Resíduos Sólidos Urbanos (PCRSU).

Numa perspetiva económica, o controlo dos custos desta operação, nomeadamente, a determinação das suas rotas, assume um papel importante e incisivo na eficiência da gestão de um concelho.

Para a identificação destas rotas existem, na literatura, dois grandes grupos de problemas: problemas com procura nos vértices (“*Node Routing Problem*” (NRP)) e problemas com procura nos arcos (“*Arc Routing Problem*” (ARP)). Subdividindo-se, os mesmos, em problemas com características específicas, e.g. o caixeiro-viajante (“*Travelling Salesman Problem*” (TSP)) e o problema do Carteiro Chinês (“*Chinese Postman Problem*” (CPP)), respetivamente.

No entanto, por vezes, é necessário adicionar restrições, aos modelos teóricos estudados, de modo, a retratarem da forma mais aproximada possível, a realidade estudada, como, por exemplo, capacidades. Ao juntarmos esta condição aos problemas referidos anteriormente, estes passam a ser conhecidos por problemas de roteamento de veículos (“*Vehicle Routing Problem*” (VRP)) e por problemas com procura nas arestas com restrição de capacidade (“*Capacitated Arc Routing Problem*” (CARP)).

Neste estudo, os pontos de recolha de RSU encontram-se em cruzamentos ou pracetas e, dada a sua natureza, a questão enquadra-se, num problema com restrições de capacidade e ofertas nos seus vértices, ou seja, um VRP.

A utilização deste problema tem vindo a crescer desde 1960. Tal deve-se, em parte, ao desenvolvimento da tecnologia computacional e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tornando, o planeamento de transportes mais acessível e preciso ao nível da identificação das suas rotas.

Para a definição do problema, houve um conjunto variado de informação que teve que ser recolhida. Esta engloba quer informação recolhida em campo, através do acompanhamento dos circuitos a estudar (registando tempos médios, graus de enchimento dos contentores, etc.), quer informação disponibilizada pela Divisão de Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos (DRRSU) da CMO e pelos responsáveis/delegados das equipas de recolha.

A informação recolhida, foi tratada através de um conjunto de códigos em VBA, que se mostrou uma ferramenta essencial para obter o tratamento dos dados. Reconheceu-se que, para a dimensão da CMO, seria vantajoso optarmos por uma metodologia de tipo “*cluster-first, route-second*”, que consiste, basicamente, em dividir primeiro o concelho em várias zonas (*clusters*) equilibradas. Encontraram-se, de seguida, os caminhos mais curtos, entre cada par de *clusters*, formando, assim, uma matriz de distâncias de dimensão r por r , sendo r o número total de *clusters*. Esta informação foi validada recorrendo ao programa *Quantum GIS*, que permite obter, entre

muitas coisas, a área geográfica do concelho de Oeiras, bem como os comprimentos de cada rua e sentidos de via.

O Modelo matemático formulado foi corrido no programa CPLEX¹, devido à sua dimensão. Face aos tempos dos circuitos atuais os resultados obtidos, tendo em conta os dados disponíveis e o tratamento dos mesmos, demonstram ser positivos e consistentes tendo em consideração a viabilidade do percurso bem como as limitações e hipóteses do estudo. Face aos dados disponibilizados os resultados traduzem uma melhoria que ronda os 13% a nível do tempo total despendido para percorrer o trajeto face a uma semana e 10% no que se refere à distância total percorrida nessa mesma semana, satisfazendo todas as restrições definidas na formulação desenvolvida. Por sua vez, estas traduzirão também, possivelmente, caso sejam aplicados os novos circuitos de recolha, melhorias no desempenho financeiro da CMO e na alocação dos seus recursos face ao tempo disponível.

¹ IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.2 url: <http://www-01.ibm.com/support/docview.wss?uid=swg24026740>

Capítulo 2. Contextualização do PCRSU – CMO

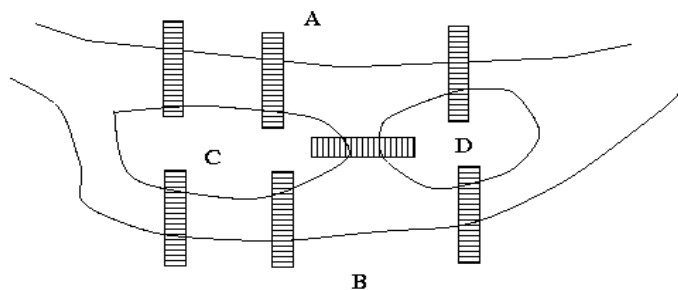
2.1. Introdução

A literatura refere que, muito provavelmente, o primeiro problema de teoria de grafos, foi introduzido em 1736 pelo matemático Leonhard Euler (1707-1783) (Gribkovskaia et al., 2005).

O problema consistia em saber se existia alguma forma de andar pela cidade de *Königsberg* e as suas duas ilhas, separadas pelo Rio *Pregel*, de modo a passar, uma e uma só vez por cada uma das suas 7 pontes.

Neste problema, o grafo representa as sete pontes (através das arestas), e as duas ilhas juntamente com as margens do rio (pelos vértices).

Figura 1 - Pontes de Königsberg



O problema foi estudado por Euler de modo a determinar um ciclo (ou circuito, se o grafo for orientado) que percorra todas as suas arestas sem as repetir, com início e fim no mesmo ponto. Este ciclo (ou circuito) é designado de ciclo (circuito) Euleriano.

Prova-se que existe, num grafo não orientado, um ciclo Euleriano quando e só quando todos os vértices tiverem grau par (Euler, 1953). No caso

de o grafo ser orientado, os graus interno e externo de cada vértice têm de ser iguais para existir um circuito Euleriano.

2.2. Problemas com Procura nos Vértices e nos Arcos

2.2.1. Introdução

Numa perspetiva económica, o controlo dos custos assume um papel importante no desempenho de uma atividade. Ao determinar, por exemplo, rotas de distribuição/recolha ótimas para um ou mais veículos de certa empresa estamos a responder de uma melhor forma possível à necessidade de contenção de custos.

Para a identificação destas rotas existem, na literatura, dois grupos de problemas. O primeiro, agrupa os problemas com procura nos vértices (“*Node Routing Problems*” – NRP) que se aplicam quando a procura/oferta se encontra em localizações dispersas e distintas. Sendo uma das suas variantes o problema do “caixeiro-viajante” (“*Traveling Salesman Problem*” – TSP). O segundo agrupa os problemas com procura nos arcos (“*Arc Routing Problem*” – ARP). Este é aplicado quando a procura/oferta é contínua ao longo das ligações. Caso se pretenda solucionar um problema com procura tanto nos vértices como nas arestas, estamos perante um GRP (“*General Routing Problem*”).

2.2.2. Caixeiro-Viajante – TSP

O problema do “caixeiro-viajante”, foi definido, inicialmente, pelos matemáticos, W.R. Hamilton, irlandês, e Thomas Kirkman, britânico (Saiyed,

2012). Mas, só em 1930, foi definido como um problema matemático por Karl Menger (Saiyed, 2012).

Este pode ser simplesmente explicado como um problema de otimização em que se pretende encontrar o ciclo que um caixeiro-viajante deve fazer, para visitar exatamente uma vez cada uma das cidades (vértices) dadas e retornar ao ponto inicial do percurso, minimizando o custo (comprimento ou duração) total do ciclo (Dantzig et al., 1954). O que é simples de explicar é, por vezes, difícil de resolver, como no TSP. Neste, a dificuldade de resolução cresce exponencialmente com o número de vértices do grafo, ou seja, com o número de cidades a visitar, tornando, assim, o TSP pertencente à classe dos problemas NP-difíceis. A prova foi feita, em 1972, por Richard M. Karp através da definição do ciclo Hamiltoniano (Karp, R.M., 1972).

2.2.3. Problema do Carteiro Chinês - CPP

Entre os problemas com procura nos arcos, um dos mais conhecidos é o problema do carteiro chinês (CPP- "*Chinese Postman Problem*"), definido por Mei-Ku Kuan em 1962 (Guan, 1962). Neste pretende-se otimizar a rota de distribuição de correspondência ao longo de um conjunto de ruas, partindo e terminando numa estação de correios. Assim, definido um grafo conexo $G = (V, E)$, tem como finalidade encontrar um ciclo (circuito) de peso mínimo que atravesse cada aresta (arco) de G , exatamente uma vez.

A determinação da Solução Ótima (SO) do CPP consiste na identificação de um ciclo/circuito Euleriano no grafo (Edmonds & Johnson, 1972). O CPP é um problema polinomial, isto é, de fácil resolução.

O ARP é uma generalização do CPP em que se pretende passar por apenas um subconjunto pré definido de arestas (arcos) do grafo, uma e uma só vez, a custo total mínimo. Como provado em 1976 por Lenstra & Rinnooy-Kan, o ARP é NP-difícil.

2.3. Problemas com Restrições de Capacidade

2.3.1. Introdução

Por vezes, é necessário adicionar um conjunto de restrições, aos modelos teóricos referidos, de modo a retratarem a realidade estudada de forma mais aproximada. Muitas vezes é necessário incluir, quer num ARP quer num NRP, restrições referentes a capacidade. Estas, não se restringem apenas, aos veículos (como volume e peso), surgindo, também, por exemplo, limitações de tempo de trabalho de uma equipa de operários ou de distância máxima a percorrer. Definem-se nestes casos, com dificuldade acrescida, os modelos base CARP (*“Capacitated Arc Routing Problem”*) e VRP (*“Vehicle Routing Problem”*), respetivamente.

2.3.2. Problemas com Procura nas Arestas e Restrições de Capacidade - CARP

O CARP, problema NP-difícil, foi estudado, inicialmente, por Golden e Wong (Golden & Wong, 1981), em grafos não orientados.

Este tem como intuito estabelecer um conjunto de rotas que minimizem o custo (ou tempo, ou distância) total, otimizando, conseqüentemente, o(s) percurso(s) dos veículos disponíveis para a distribuição (recolha) de produtos.

Nesta premissa, há que ter em atenção que os veículos partem do “depósito” (ponto inicial) e que a procura (oferta) que se encontra ao longo das arestas é satisfeita. Arestas sem procura a satisfazer podem, ou não, fazer parte dos circuitos finais. A capacidade de carga dos veículos tem de ser suficiente para satisfazer, na totalidade, o serviço das arestas afetadas. As rotas terminam no ponto de partida, o depósito.

Devido à sua complexidade foram desenvolvidas algumas heurísticas. Segundo Corberán & Prins (2010), desde o livro reeditado de Dror (2000) foram realizados alguns estudos sobre heurísticas aplicadas ao CARP baseadas, por exemplo, em métodos do tipo “*route first-cluster second*”. Esta abordagem consiste em construir um circuito, ignorando a capacidade do veículo, dividindo-o, de seguida, em possíveis rotas (Beasley, 1983; Ulusoy, 1985).

A primeira metaheurística aplicada ao CARP é uma pesquisa tabu, denominada de CARPET, desenvolvida por Hertz et al. (2000). A pesquisa tabu é uma heurística que guia e controla a pesquisa local, aceitando movimentos não melhorativos, e não voltando aos movimentos mais recentes guardados.

Entre os métodos mais recentes, associados à metodologia referida salienta-se o de Brandão & Eglese (2008) que resolveram o CARP por pesquisa tabu. Neste trabalho obtiveram-se soluções de elevada qualidade em tempos computacionais aceitáveis (sem acesso a qualquer memória de longo prazo por parte da heurística).

Mei et al. (2009), por sua vez, solucionaram o CARP aplicando uma heurística denominada Operador de Reparação Global (GRO). Nesta heurística o problema é formulado como um problema de empacotamento (*bin-packing*

problem) e obtém uma solução através de uma heurística de inserção. Sendo, de seguida, melhorada a solução inicial recorrendo a pesquisa tabu. Desta forma, cria-se um conjunto de dados candidatos com atribuições efetuadas através de variáveis binárias (1 – possível candidato para a rota; 0 – candidato não escolhido). Finalmente, através dos dados arquivados, é gerado um conjunto de rotas com as variáveis candidatas, até encontrar uma solução de menor custo.

Como mostram alguns investigadores [e.g. (Golden & Assad, 1995; Eiselt et al., 1995a; Eiselt et al., 1995b; Lacomme et al., 2006; Maniezzo & Roffilli, 2008; Longo et al., 2006)] o CARP tem sido útil para um vasto conjunto de casos práticos reais. São disso exemplo a distribuição de correio, a leitura de contadores, a recolha de resíduos domésticos e a limpeza de ruas.

2.3.3. Problemas com Procura nos Vértices e Restrições de Capacidade – VRP

Apresentado por Dantzig e Ramser em 1959 (Dantzing & Ramser, 1959), o VRP pretende encontrar as rotas de custo (ou tempo, ou distância) total mínimo, satisfazendo toda a procura em diferentes pontos. Cada ponto de procura (vértice) é visitado apenas uma vez. Os percursos do(s) veículo(s) iniciam-se e terminam num depósito, depois de satisfazer toda a procura. Por vezes, podem também ter de passar por um posto complementar, antes do regresso.

Uma das restrições deste tipo de problema relaciona-se com a capacidade do veículo, tal como volume ou peso máximo. Por vezes, surgem

também limites associados ao tempo de viagem, ou intervalos de tempo para satisfação dos clientes (Sahoo et al., 2005).

Desde 1960 que a utilização deste problema tem vindo a crescer. Tal deve-se, em parte, ao desenvolvimento da tecnologia computacional e dos Sistemas de Informação Geográfica, tornando o planeamento de transportes mais acessível e preciso ao nível da identificação das suas rotas (Toth & Vigo, 2002).

A aplicabilidade do VRP é abrangente. Exemplificando, salienta-se o estudo de Erkut & Maclean (1992) sobre a melhoria da eficiência energética (no caso do consumo de combustível dos transportes) em Alberta (Estado Minnessota, EUA) com a colaboração do Departamento de Energia de Alberta. Este departamento lançou um programa de auditoria computadorizada resolvido por Erkut & Maclean através da definição de um VRP e testado na empresa *Scott National* (distribuidor alimentar). Nas análises efetuadas pelos investigadores verificou-se que a aplicação deste *software* gera poupanças potenciais (nos combustíveis) na ordem dos 34% pela redefinição dos trajetos dos transportes (Erkut & Maclean, 1992).

Timlin & Pulleyblank (1992), por exemplo, desenvolvem uma heurística para o VRP de forma a reduzir o tempo que os colaboradores da petrolífera da Nigéria (*Mobil Producing Nigeria*) demoram a inspecionar 45 plataformas petrolíferas que a empresa possui em *offshore*. Esta necessitava de um modelo operacional que determinasse as rotas diárias dos seus helicópteros. Para tal, foi definido e estudado o *Helicopter Routing Problem* (HRP) que trouxe uma eficácia de 15% nas suas deslocações diárias.

Solomon et al. (1992), por sua vez, adaptaram o VRP para projetar uma estratégia de modo a minimizar os custos da aplicação de larvicida nas moscas pretas adultas (portadoras de doenças infecciosas, como a oncocercose) em África. Os investigadores recorreram ao VRP para modelar o problema de transporte de larvicida por helicóptero. A otimização das rotas gerou uma poupança, por helicóptero, de 100 mil dólares por ano.

Quando num VRP se pretende determinar uma sequência de rotas para vários dias de um certo período (por exemplo: uma semana ou um mês) obtém-se um PVRP (*Period Vehicle Routing Problem*). Em certos problemas de recolha de lixo, o número de vezes que se recolhe o contentor, por semana, deve ser considerado uma variável de decisão. A sua determinação indica uma frequência de recolha (neste exemplo, semanal), repetindo-se nas semanas seguintes. Em suma, as visitas aos pontos de recolha deverão ocorrer, sempre, na mesma combinação de dias durante a semana (Baptista et al., 2002).

Os dias de visita a cada ponto de recolha podem, também, incluir restrições que proíbam recolher o mesmo ponto em dias consecutivos, ou limitar o número de recolhas por semana.

O PVRP é uma extensão do VRP, introduzida por Christofides e Beasley em 1984 (Teixeira et al., 2004). Como referido, o VRP é NP-difícil. O PVRP, conseqüentemente, sendo pelo menos tão difícil como o que deriva, tem sido resolvido através de heurísticas ou metaheurísticas.

Potvin et al. (1996), por exemplo, utilizam a heurística tabu para solucionar um VRP com janelas de tempo (VRPTW), alcançando importantes resultados. No mesmo ano, Potvin & Bengio (1996) para o mesmo problema

(VRPTW), utilizaram um algoritmo de pesquisa genética com o qual obtiveram rotas de qualidade semelhantes às do estudo anterior. Esta pesquisa gera um conjunto de soluções que por ação de operadores genéticos evoluem no sentido da “otimização”.

Capítulo 3. Funcionamento da Recolha de Resíduos na CMO

O Decreto-Lei n.º 178/2006 (do Diário da República, 1.ª série – n.º 171— 5 de Setembro de 2006) define a RSU como uma operação de recolha de resíduos com vista ao seu transporte. A RSU é executada em horários pré-estabelecidos com periodicidade variável consoante a capacidade do veículo, as características dos resíduos e do meio envolvente (rural/ urbano).

A RSU é uma das preocupações de qualquer município, envolvendo elevados encargos com todo o processo associado, que vão desde a aquisição de viaturas à manutenção e disposição dos equipamentos de deposição de resíduos.

A recolha de resíduos na CMO está dividida em 4 turnos de seis horas com início: às 06:45 horas, às 14:15 horas, às 16 horas e às 23 horas. O concelho dispõe de cerca de 12.000 contentores (pontos de recolha) que são recolhidos num total de 35 circuitos. A frota (de veículos) pertence à CMO, estando esta encarregue de recolher três tipos de resíduos:

- Os resíduos sólidos e urbanos, onde estão englobados, os indiferenciados, o papel, as embalagens, o vidro e os óleos alimentares.
- Os resíduos especiais representando, nomeadamente, resíduos volumosos, resíduos verdes, resíduos de construção e demolição, pilhas e acumuladores, resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (reee), lâmpadas fluorescentes, *toners* e tinteiros,

medicamentos fora de prazo, radiografias, óleos lubrificantes, baterias (de viaturas de automóveis), pneus, viaturas abandonadas, dejetos caninos, embalagens e resíduos de práticas agrícolas.

- E os resíduos de grandes produtoras, como por exemplo, as fábricas.

O projeto em estudo foca o turno das 16 horas, e tem como objetivo ajudar na definição de dois circuitos de recolha de resíduos indiferenciados. Nestes dois circuitos existem 92 pontos de recolha. Destes, 77 dividem-se entre Ilhas (de $3m^3$) e Moloks (de $3m^3$ e $5m^3$) que são recolhidos com o auxílio de uma grua instalada nos respetivos veículos. Os restantes 15 pontos são constituídos por contentores coletivos e recipientes privados, que oscilam entre os 800 litros e os 120 litros (ver Figura 2).

Figura 2 – Depósitos de recolha



Cada equipa de trabalho (um motorista, também ele operador de grua, e um ou dois cantoneiros) está afeta a um turno de 6 horas no qual se incluem 30 minutos de higienização (no final do turno) e 30 minutos de pausa para a refeição (a meio do percurso), sobrando, assim, 5 horas para efetuar o circuito.

Por sua vez, cada circuito tem início na garagem (onde se encontram os veículos e onde a equipa se apresenta). Depois de efetuada a rota de recolha de resíduos, os veículos dirigem-se à central de tratamento de resíduos da Tratolixo, descarregando os resíduos e finalizando o circuito com o regresso à garagem.

A Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Tratolixo S.A., localizada em Trajouce, na Freguesia de São Domingos de Rana, é responsável pelo tratamento dos RSU dos municípios de Mafra, Sintra, Cascais e Oeiras desde 2009 (ver Figura 3). No entanto, não é a central que está encarregue pela recolha, mas sim os próprios Municípios. Embora, para esse efeito, os Municípios possam contratar empresas privadas através de concursos públicos.

Figura 3 – Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Tratolixo, S.A.



Figura 4 – Localização da Tratolixo

A Tratolixo é uma empresa de capitais públicos, detida a 100% pela AMTRES - Associação de Municípios de Cascais, Mafra, Oeiras e Sintra para o Tratamento de Resíduos Sólidos. As suas unidades de tratamento distribuem-se geograficamente (como mostra a Figura 4) pela Abrunheira (1) (Mafra), Ericeira (3) (Mafra) e Trajouce (2) (Cascais) onde se encontra a unidade de tratamento em estudo.



Uma realidade associada aos circuitos em estudo mostra que devido à duração do turno e à distância dos pontos de recolha à central da Tratolixo, é impossível um veículo fazer parte da recolha, descarregar (em caso de excesso de carga) e voltar ao circuito para finalizar a mesma. Assim, cada veículo faz apenas um circuito de recolha com início e fim na garagem, e passagem pela central da Tratolixo.

Capítulo 4. Metodologia de Investigação

Para a aplicação em estudo foi necessário fazer um levantamento de dados/informações. Tal foi possível com a colaboração de alguns departamentos da CMO, tendo exigido ainda o desenvolvimento de um conjunto de processos essenciais ao tratamento e agrupamento desses dados, facilitando a sua utilização no modelo.

A informação recolhida foi a seguinte:

- Para cada ponto de recolha (dos circuitos em estudo):
 - Tipo de equipamento para deposição de lixo doméstico indiferenciado e suas capacidades;
 - Número de equipamentos (de resíduos indiferenciados);
 - Periodicidade de recolha;
 - Tempos de recolha médios;
 - Grau de enchimento médio;
 - Localização.

- Para cada veículo (disponíveis para os circuitos em estudo):
 - Capacidade;
 - Histórico das pesagens das cargas para os vários dias da semana.

- Informação geográfica:
 - Ruas do concelho
 - Coordenadas iniciais e finais de cada segmento de rua;
 - Comprimento de cada segmento de rua;
 - Sentido de cada segmento de rua.

Com o apoio da Divisão de Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos (DRRSU) da CMO, bem como dos responsáveis/delegados das equipas de recolha, foi possível acompanhar, durante 2 semanas (de segunda a sábado), os circuitos em estudo.

Através deste acompanhamento diário foi possível recolher grande parte da informação pretendida para cada ponto de recolha. Para além de terem sido verificadas grandes limitações/dificuldades das equipas de recolha na execução do seu serviço. A título exemplificativo refere-se: o estacionamento abusivo por parte da população, que ao impedir/prejudicar a recolha dificulta, também, o cumprimento do turno, no horário pré-estabelecido, por parte das equipas; o facto de a deposição de lixo não ser efetuada da maneira mais correta, dando trabalho acrescido às equipas, ou, até mesmo, às manobras necessárias, (grande parte de marcha-atrás), para os veículos realizarem a recolha em certos pontos.

Foram registados então os tempos de recolha em cada ponto durante a semana. Nos pontos de mais difícil acesso, ou seja, que exigem manobras mais demoradas, foi acrescentado ao tempo de recolha, o tempo da manobra, indispensável para o início da recolha. De seguida, calculou-se a média dos tempos (em segundos) para cada ponto.

Com a impossibilidade de pesar os resíduos em cada equipamento individualmente, e com a necessidade de saber a pesagem média em cada ponto, foi efetuada uma associação por proporcionalidade. Assim, a partir da capacidade e do grau de enchimento dos contentores para cada dia da

semana, bem como da pesagem do camião no final da recolha, foi possível chegar a uma estimativa de pesagem para cada ponto de recolha.

A informação geográfica do Concelho de Oeiras foi facultada com um termo de compromisso de confidencialidade. A informação apenas se destina a uso pessoal e para os efeitos relativos a este estudo. Esta foi disponibilizada pela empresa Municípa, E.M., S.A. em colaboração com o gabinete de sistemas de informação geográfica da CMO.

Devido à base de dados geográfica ser um instrumento de informação pago, foi facultada, a título gratuito, uma versão de 2009 que, por já desatualizada, constitui uma das limitações deste projeto. De facto, algumas ruas podem ter deixado de existir, outras podem ter invertido o sentido das vias, ou podem inclusive ter sido criadas novas ruas no Concelho de Oeiras.

Para a leitura dos dados do Sistema de Informação Geográfica, foi necessária a utilização de um programa, gratuito e de *open source*, o *Quantum GIS*. O programa deu acesso aos dados elementares, nomeadamente, os relativos a segmentos de rua, pois, uma rua pode ter vários segmentos de rua. Um segmento de rua é delimitado por cruzamentos. Cada segmento (arco) tem associado um sentido, um comprimento, coordenadas (inicial e final), um nome, a freguesia a que pertence, entre outros dados.

Após a recolha de dados há que os tratar e trabalhar. Tendo o Concelho de Oeiras dimensão bastante razoável, com um número total de segmentos de rua significativo (7068), a formalização seria muito pesada, exigindo muitas restrições e variáveis. Tal levou a uma abordagem baseada num método do tipo “*cluster-first route-second*”. Este consiste, basicamente, em dividir/partir o

concelho em várias zonas de recolha, definido super nodos (*clusters*), como se pode ver em anexo (Tabela VI, Figura 8 e Figura 9). Estes super nodos (*clusters*) foram construídos manualmente, a partir da proximidade dos pontos de recolha e respetivas freguesias no concelho de Oeiras. De seguida, criou-se um grafo, G'_d (definido no capítulo 5.2.1), com os super nodos (*clusters*) e determinaram-se os caminhos mais curtos entre cada par de *clusters*, com o auxílio do *Google Maps*. Formou-se, assim, uma matriz quadrada de distâncias de dimensão $r + 2$, sendo r o número total de *clusters* e os restantes 2 nodos representam a garagem e a Tratolixo. Os r super nodos (*clusters*) terão como pontos de ligação entre si os pontos de recolha mais próximos.

Assim, foi depois possível trabalhar cada *cluster* individualmente, tornando o tratamento da informação e o resultado da aplicação do modelo de mais rápida execução. Para cada *cluster* há a considerar, apenas, os segmentos de rua a ele inerentes.

Definido o grafo dos *clusters*, o próximo passo foi o de resolver um VRP em G'_d , através do modelo apresentado no capítulo 5.2.1. Identifica-se assim a sequência de *clusters* a servir por cada veículo p desde a garagem até à Tratolixo, ficando-se também a conhecer os nodos iniciais (k_1) e finais (k_{n+1}) dentro de cada *cluster* (k).

Foi efetuado um tratamento de dados no Excel onde se numeram todas as coordenadas (cruzamentos) diferentes. Uma vez que a informação geográfica disponibilizada de cada segmento de rua não indica a que outros segmentos este se pode cruzar, foi necessário o auxílio de funções do Excel, criadas para o efeito. Estas associam as coordenadas iniciais e finais de

segmentos (arcos) que coincidam, criando ligação entre os diferentes segmentos (arcos) e gerando a rede do concelho de Oeiras. A interceção dos segmentos é representada por um nodo no problema estudado.

Salienta-se ainda que apesar de dois cruzamentos poderem estar ligados, através de segmentos, as regras de trânsito podem impossibilitar a sua passagem em sequência (existência de ruas de sentido único). Foi então criada uma macro para verificar se cada rua pode ser percorrida nos dois sentidos, tal é possível por para cada segmento de rua conter a informação do seu sentido.

Foram criadas mais duas macros. Uma agrupa os dados já trabalhados e os reescreve para a formalização do problema, identificando os parâmetros de cada variável e as respetivas restrições. E outra que converte a formalização para um ficheiro compatível com o programa CPLEX. Sendo este o *software* utilizado para resolver os dois modelos de programação linear inteira apresentados no capítulo 5.2.

Feito este último passo, temos a informação necessária para resolver um VRP, nas redes mais pequenas, ou seja, para a identificação do circuito dentro de cada *cluster*. Para tal foi utilizado o segundo modelo do capítulo 5.2.2, de forma a que os pontos de recolha sejam todos recolhidos e no tempo mínimo.

Após a solução obtida pelo CPLEX, foi desenvolvida uma nova macro que a transforma num texto. Este, ao ser transferido para o programa utilizado pela CMO, o *Quantum GIS*, torna possível identificar que circuito deve cada veículo efetuar em cada dia da semana. O resultado desta operação ilustra-se

na Figura 5, que mostra, a mais carregado, o circuito otimizado, para um sábado, referente ao *cluster*/freguesia de Algés.

Figura 5 - Circuito otimizado de sábado do *cluster*/freguesia de Algés



Capítulo 5. Definição e Formalização do PCRSU – CMO

5.1. Definição e Notação do PCRSU - CMO

O problema em estudo, denominado por PCRSU, enquadra-se num problema com restrições de capacidade e ofertas nos vértices (cruzamentos ou pracetas (becos)) conhecido por VRP.

Este pode ser definido através de um par formado por um conjunto finito de elementos, denominados vértices ou nodos ($V = \{1, 2, 3, \dots, n + 1\}$), e pelo conjunto das suas ligações, também elas em número finito e representadas por arestas (E), e arcos (A'). Este par é denominado por grafo e representado por $G = (V, E \cup A')$.

Um grafo pode ser orientado, não orientado ou misto. O presente estudo apresenta-se sobre um grafo orientado. Os grafos são um poderoso instrumento de representação capazes de modelar a informação de forma sintética e relacional (Livi & Rizzi, 2013).

Considere-se que o arco $a = (i, j) \in A'$ identifica o sentido de um segmento de rua do vértice i para o vértice j . Cada aresta de E é substituída por dois arcos opostos, ou seja, $A = A' \cup \{(i, j), (j, i) : (i, j) \in E\}$. O conjunto $V = \{1, 2, 3, \dots, n + 1\}$ inclui $n - 1$ vértices referentes a cruzamentos ou pracetas, o vértice 1 que designa o ponto de partida (garagem), e o $n + 1$ a Tratolixo. Existem P veículos, de capacidade não homogénea, que podem efetuar o serviço. Cada cliente, representando um ponto de recolha, $i \in V \setminus \{1, n + 1\}$ tem

uma oferta não negativa q_i^d referente à quantidade de resíduos a recolher. Cada ligação (i, j) tem associado um custo c_{ij}^d e um tempo de viagem t_{ij}^d .

O regresso à garagem, depois de efetuada a descarga na TratoLixo, não será considerado no modelo, pois trata-se apenas da identificação de um caminho mais curto.

As periodicidades são fixas e identificadas pela Câmara Municipal de Oeiras, representando, portanto, dados do problema.

Designa-se por:

P - o número total de veículos disponíveis para efetuar a recolha na zona em estudo ($p = 1, 2, \dots, P$);

d - o dia da semana para recolha ($d = 1, 2, \dots, 6$);

$V_d = \{i \in V \setminus \{1, n + 1\} : i \text{ tem que ser recolhido no dia } d\}$;

$A_d \subseteq A$ - ligações entre os vértices de $V_d \cup \{1, n + 1\}$

t_{ij} - o tempo (em segundos) da deslocação em vazio na ligação $(i, j) \in A$;

t_i^d - o tempo (em segundos) utilizado na recolha do nodo $i \in V_d$;

q_i^d - quantidade (em quilos) de resíduos a recolher em $i \in V_d$;

W^p - capacidade total (em quilos) do veículo p ;

L^{pd} - carregamento mínimo (em quilos) a recolher no dia d por p ;

T - tempo máximo (em segundos) disponível pela equipa;

M - número suficientemente grande.

5.2. Formalização do PCRSU – CMO

Para a resolução do PCRSU na CMO foi utilizada uma abordagem do tipo “*cluster-first, route-second*”, que foi explicada no capítulo 3 (Metodologia de Investigação). Para tal, foi necessário desenvolver duas formulações que embora bastante idênticas, apresentam algumas especificidades. De seguida apresenta-se uma formulação geral que é a base dos dois modelos. Posteriormente, serão identificadas as diferenças entre os dois modelos.

$$x_i^{pd} = \begin{cases} 1, & \text{se o nodo } i \text{ é recolhido pelo veículo } p \text{ no dia } d \quad (i \in V_d \setminus \{1, n+1\}) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

y_{ij}^{pd} = número de vezes que o veículo p passa no arco $(i, j) \in A_d$ no dia d

f_{ij}^{pd} = fluxo em $(i, j) \in A_d$ relacionando o número de ligações que falta atravessar para completar a rota ou um subcircuito.

O modelo base define-se então por:

$$\sum_{d=1}^6 \text{Min} \sum_{p=1}^P \left(\sum_{(i,j) \in A_d} t_{ij} y_{ij}^{pd} + \sum_{i \in V_d} t_i x_i^{pd} \right) \quad (5.1)$$

s. a.:

$$\sum_{j:(i,j) \in A_d} y_{ij}^{pd} - \sum_{j:(j,i) \in A_d} y_{ji}^{pd} = 0 \quad \forall d \forall p \forall i \in V_d \quad (5.2)$$

$$\sum_{j:(1,j) \in A_d} y_{1j}^{pd} - \sum_{j:(j,1) \in A_d} y_{j1}^{pd} = 1 \quad \forall d \forall p \quad (5.3)$$

$$\sum_{j:(n+1,j) \in A_d} y_{n+1j}^{pd} - \sum_{j:(j,n+1) \in A_d} y_{jn+1}^{pd} = -1 \quad \forall d \forall p \quad (5.4)$$

$$x_i^{pd} \leq \sum_{j:(j,i) \in A_d} y_{ji}^{pd} \quad \forall d \forall p \quad \forall i \in V_d \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in V_d} q_i x_i^{pd} \leq W^p \quad \forall d \forall p \quad (5.6)$$

$$\sum_{i \in V_d} q_i x_i^{pd} \geq L^{pd} \quad \forall d \forall p \quad (5.7)$$

$$\sum_{i \in V_d} t_i x_i^{pd} + \sum_{(i,j) \in A_d} t_{ij} y_{ij}^{pd} \leq T \quad \forall d \forall p \quad (5.8)$$

$$\sum_{j:(1,j) \in A_d} f_{1j}^{pd} = \sum_{(i,j) \in A_d} y_{ij}^{pd} \quad \forall d \forall p \quad (5.9)$$

$$\sum_{j:(j,i) \in A_d} f_{ji}^{pd} - \sum_{j:(i,j) \in A_d} f_{ij}^{pd} = \sum_{j:(j,i) \in A_d} y_{ji}^{pd} \quad \forall d \forall p \quad (5.10)$$

$$\sum_{j:(j,n+1) \in A_d} f_{j,n+1}^{pd} = 1 \quad \forall d \forall p \quad (5.11)$$

$$y_{ij}^{pd} \leq f_{ij}^{pd} \leq M y_{ij}^{pd} \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall d \forall p \quad (5.12)$$

$$\sum_{p=1}^P x_i^{pd} = 1 \quad \forall d \forall i \in V_d \setminus \{1; n+1\} \quad (5.13)$$

$$x_{ij}^{pd} \in \{0,1\} \quad \forall d \forall p \quad (5.14)$$

$$y_{ij}^{pd} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall d \forall p \quad (5.15)$$

$$f_{ij}^{pd} \geq 0 \quad \forall d \forall p \quad (5.16)$$

5.2.1. Modelo 1 – Circuito nos Super Nodos (Cluster)

O primeiro modelo tem por base no grafo de super nodos em que $G'_d=(V'_d, A'_d)$, sendo $V'_d = \{1, n + 1\} \cup \{V_d^1, \dots, V_d^r\}$ um conjunto finito de k super nodos (*clusters*), o nodo 1 que representa o ponto de partida (garagem) e o $n + 1$ para Tratolixo. Os k super nodos têm procura dada pelas somas das procuras dos pontos de recolha para o dia d neles incluídos. As ligações entre cada par de super nodos (*clusters*) para o dia d , estão identificadas em A'_d e representam as ligações entre os vértices mais perto entre os respetivos super nodos. Basicamente, este modelo, identifica o trajeto ótimo de recolha dos super nodos, iniciando na garagem e terminando na Tratolixo, respeitando as capacidades dos veículos.

Para tal, este modelo pode definir-se substituindo por G'_d o grafo do modelo base. Assim, na função (5.1) pretende-se minimizar o tempo (t') percorrido por todos os camiões p nos arcos utilizados em vazio bem como o tempo (t') de recolha total em cada super nodo (x_i^{pd}) (*cluster*), em todos os dias da semana d . Neste caso, x_i^{pd} assume o valor 1 se o veículo p for afeto à recolha do super nodo i no dia d .

Com as restrições (5.2), (5.3) e (5.4) é garantido que cada veículo em cada dia d sai do ponto inicial 1 (garagem) e chega ao ponto final $n + 1$ (Tratolixo), e entra e sai o mesmo número de vezes de cada super nodo da rede. Através das condições (5.5), cada conjunto de pontos de recolha afetos ao super nodo (*cluster*) (x_i^{pd}) só é recolhido por um camião que por lá passe. E (3.13) garantem que todos os pontos são recolhidos por um e um só camião.

A quantidade de resíduos, recolhidos por um camião não pode exceder a sua capacidade de carga, o que se garante com (5.6). Para que a recolha entre os veículos não seja muito desequilibrada impõem-se as restrições (5.7), que exigem que cada veículo recolha um certo número mínimo de quilos no dia d .

As restrições (5.8) exigem que o tempo empregue pelo camião p no dia d , quer a percorrer os arcos utilizados entre cada super nodo quer na recolha dos resíduos, não ultrapasse o tempo que cada equipa tem para completar o seu turno até à Tratolixo. De salientar que falta acrescentar nesta restrição os tempos de percurso dentro de cada *cluster*. Estes não foram adicionados uma vez que no final da soma dos tempos, já com os tempos dentro de cada cluster encontrados (no modelo 2 capítulo 5.2.2) não se ultrapassou o tempo total que cada equipa tem para executar a recolha até à chegada à Tratolixo.

Com as condições (5.9) a (5.11) assegura-se a conexidade das rotas, fazendo com que não se criem sub-rotas não ligadas ao depósito.

Sendo M uma constante suficientemente elevada, as restrições (5.12) garantem que as variáveis de fluxo só assumem valor positivo caso o camião utilize essas mesmas ligações.

5.2.2. Modelo 2 – Circuito dentro de cada Cluster

Posteriormente, serão determinados os circuitos de recolha dentro de cada *cluster*, sendo necessário recorrer a tantos grafos quantos os *clusters*. Estes, representam-se por $G''_d^k = (V_d^k, A_d^k)$, onde $V_d^k = \{k_1, k_2, k_3, \dots, k_{n+1}\}$ indica os vértices ou nodos referentes ao cluster k , e $A_d^k = \{(i, j) : (i, j) \in A \wedge i, j \in V_d^k\}$

que designam as ligações entre nodos do *cluster* k ($k = 1, \dots, r$). Define-se ainda um subconjunto $A_{di}^k \subset A_d^k$, que contém os arcos através dos quais é possível recolher o nodo $i \in V_d^k$. Neste segundo modelo o nodo $k_1 \in V_d^k$, é um ponto de recolha, e simultaneamente, o início do trajeto no *cluster* k para o dia d , que terá como término o nodo $k_{n+1} \in V_d^k$, também, este, um ponto de recolha. Para se resolver este VRP em $G''^k_d = (V_d^k, A_d^k)$, só é necessário recorrer à parcela de minimização de tempos, tendo em conta o número de vezes que o veículo p passa no arco (i, j) , sem inclusão do tempo de recolha.

Para se resolver este VRP em $G''^k_d = (V_d^k, A_d^k)$, só é necessário recorrer à minimização de tempos associados ao percurso do veículo p em (5.1), pois os de tempos de recolha já estão contabilizados no modelo dos super nodos. Tendo esta nova função a seguinte expressão, $Min \sum_{d=1}^6 \sum_{p=1}^P (\sum_{(i,j) \in A} t_{ij} y_{ij}^{pd})$.

As mesmas condições (5.2), (5.3) e (5.4), serão usadas neste modelo, garantindo que o veículo sai do ponto inicial k_1 (ponto de recolha) e chega ao ponto final k_{n+1} (também ele um ponto de recolha), e entra e sai o mesmo número de vezes de cada vértice da rede.

As condições (5.5) também são necessárias uma vez que cada ponto de recolha (x_{ki}^{pd}) só é recolhido por um camião que por lá passe. Mas agora com $j: (j, i) \in A_{di}^k$, pois existem pontos de recolha k_i que só podem ser recolhidos, se o veículo utilizar uma ligação para lá chegar. As restrições (5.5) ficam, então, $x_i^{pd} \leq \sum_{j: (j,i) \in A_{di}^k} y_{ji}^{pd} \quad \forall d \forall p \quad \forall i \in V_d^k$. Pelas mesmas razões que no modelo anterior as restrições de (5.9) a (5.16) também são aqui necessárias.

Capítulo 6. Discussão de Resultados

Com o tratamento da informação recolhida nomeadamente através de um conjunto de códigos em VBA que foram uma ferramenta essencial para o tratamento dos dados verifica-se que o tempo médio de recolha quando comparado com o circuito atual traduz resultados positivos. Os circuitos encontrados diferindo do percurso atual utilizado pela CMO, satisfazem as exigências identificadas. De facto, passam por todos os pontos de recolha estipulados pelo Departamento de Resíduos Sólidos Urbanos, apesar de as quantidades de recolha serem estimadas.

Os resultados foram apresentados numa base diária para fazer comparação com os circuitos estipulados pela CMO, onde existe uma procura semanal média de 100 toneladas nos dois circuitos.

A comparabilidade dos dados foi realizada através da ajuda de um programa de rastreio de veículos, o *Cartrack* que mede o tempo real bem como as distâncias percorridas pelos veículos nos circuitos delineados pela CMO. Estes foram posteriormente comparados com os resultados obtidos pela resolução dos modelos formalizados.

Como já referido, o estudo tem como objetivo a determinação de circuitos para a recolha de RSU indiferenciados que venham a melhorar os tempos de recolha atuais.

Para comparar os resultados obtidos, deste estudo, com a realidade, isto é, com os circuitos atualmente utilizados pela CMO, foram utilizadas duas medidas. A primeira recorre ao tempo, desde o momento que o veículo sai da

garagem até à sua chegada ao aterro (Tratolixo). Foi considerada uma velocidade média de 25 km/h adotada para a comparação com o circuito atual. A segunda utiliza os quilómetros contabilizados no percurso. Este meio de comparação é mais fidedigno, porque não é influenciado por eventuais obstáculos ao percurso, nomeadamente, o trânsito, estacionamento abusivo, ou mesmo a má deposição de lixo.

Outro fator a ter em conta é que a comparação de resultados não pode ser efetuada individualmente em cada circuito estudado. Pois com a utilização do método “cluster-first route-second” o Concelho fica dividido em zonas, e cada zona é recolhida por um só veículo, o que não acontecia anteriormente. Assim, pontos de recolha que eram recolhidos por um dos circuitos podem agora ser recolhidos pelo outro circuito, e vice-versa. Posto isto, a comparação será feita diariamente no conjunto dos dois veículos.

Como referido, o modelo apenas inclui o trajeto do veículo desde a sua saída da garagem, passando pelos pontos a recolher nesse dia, até à Tratolixo. Atendendo a este princípio é necessário deduzir ao tempo de turno (6 horas) os restantes tempos que se indicam na Tabela I.

Tabela I - Tempos disponíveis (em horas) para execução de tarefa

Tempo por turno	06:00
Tempo concedido para higienização e alimentação	01:00
Tempo médio de retorno à garagem desde a Tratolixo	00:16
Tempo médio de despejo na Tratolixo	00:08
Resultando num tempo disponível para o percurso	04:36

Assim, cada equipa de trabalho tem 4 horas e 36 minutos disponíveis para efetuar o percurso de recolha.

Com o modelo em estudo, chega-se a um tempo diário para cada veículo percorrer o respetivo circuito, que se apresenta na Tabela II. Na mesma tabela verifica-se o tempo em folga para cada equipa de trabalho, folga essa dada pela diferença entre o tempo disponível para o percurso e o tempo diário otimizado encontrado.

Tabela II - Tempos diários (em horas) de recolha otimizados

	segunda	terça	quarta	quinta	sexta	sábado
Veículo 1	03:45	02:50	03:05	02:59	03:12	04:30
Folga Veículo 1	00:51	01:46	01:31	01:37	01:24	00:06
Veículo 2	03:30	03:24	03:58	03:18	03:46	03:45
Folga Veículo 2	01:06	01:12	00:38	01:18	00:50	00:51

Constata-se que o sábado ficou o dia mais carregado em termos de tempos de trabalho e a terça e quinta-feira os dias mais folgados.

Na Tabela III, apresentam-se os tempos dos trajetos diários dos dois veículos agrupados. Verifica-se uma melhoria considerável em todos os dias da semana quando comparados com os tempos das rotas atuais. Refira-se, ainda, que os tempos atuais, fornecidos pela CMO, dizem respeito às semanas da recolha dos dados recolhidos em campo.

Numa perspetiva semanal, o tempo total otimizado atinge as 42:03 horas, alcançando uma melhoria de 6:38 horas face ao tempo total atual. Observa-se assim um decréscimo na ordem dos 13.6% face ao tempo atual.

Tabela III - Tempo (em horas) percorrido

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Semanal
Tempo total atual (TA)	09:21	07:47	08:00	07:08	07:45	08:40	48:41
Tempo total otimizado (TO)	07:15	06:14	07:03	06:17	06:58	08:15	42:03
Diferença (TO-TA)	(02:06)	(01:33)	(00:57)	(00:51)	(00:47)	(00:25)	(06:38)
Varição percentual (TO/TA) -1	-22,36%	-19,82%	-11,95%	-11,92%	-10,08%	-4,82%	-13,63%

Apresenta-se, de seguida, a Figura 6 e 7, onde se consegue comparar os circuitos feitos atualmente, a uma segunda-feira, pelos dois veículos (Figura 6), com o circuito otimizado (Figura 7), referente aos mesmos veículos e ao mesmo dia da semana. Refira-se que estas se cingem ao trajeto entre *clusters* e não dentro dos mesmos.

Figura 6 - Circuitos atuais (segunda-feira)

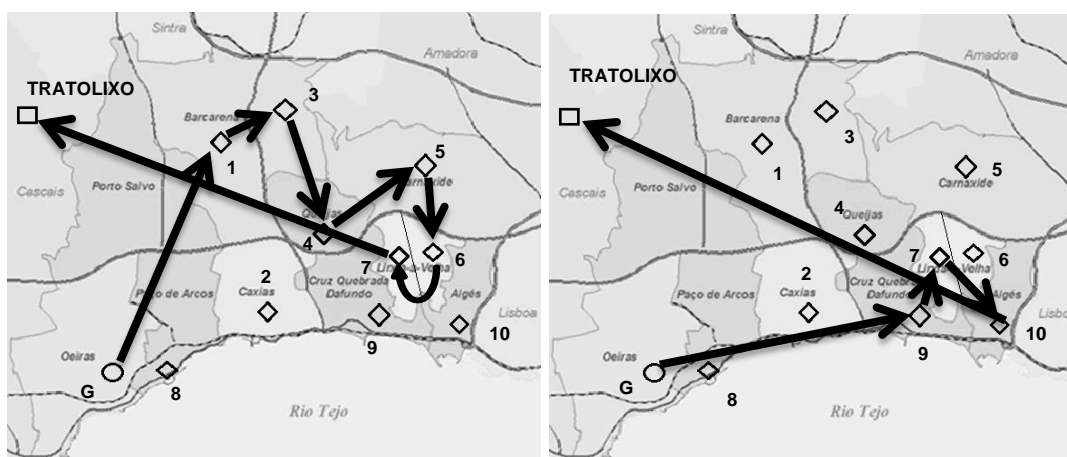
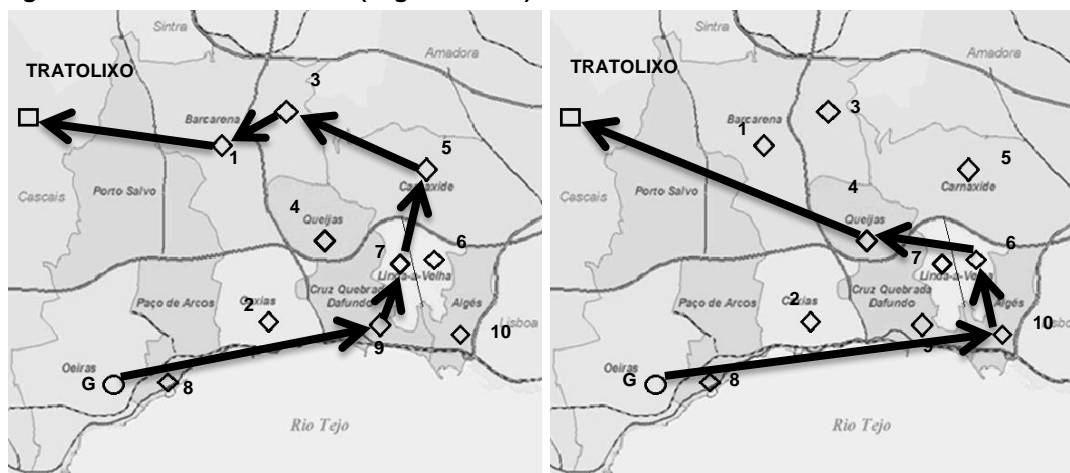


Figura 7 - Circuitos otimizados (segunda-feira)



Ao comparar as rotas ilustradas nas figuras, verifica-se que os percursos se tornam muito mais diretos e eficientes, pois estão menos sobrepostos. Esta afirmação pode ser sustentada pela comparação a nível da distância percorrida, em quilómetros (Tabela IV). Nela regista-se uma melhoria na ordem dos 10.5% equivalentes a cerca de 50 quilómetros semanais. Verifica-se uma melhoria mais significativa na quinta-feira com um decréscimo de 16.9%, que se traduz em 13,4 quilómetros.

Quanto ao dia semanal (segunda-feira) ilustrado, verifica-se uma redução de 5 quilómetros, equivalente a um decréscimo de 6.5% face ao circuito atual.

Tabela IV - Distância (em metros) percorrida

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Semanal
Distância total percorrida atual (DA)	76 300	79 920	76 220	79 710	76 410	83 160	471 720
Distância total percorrida otimizada (DO)	71 328	68 152	70 981	66 256	71 301	74 317	422 334
Diferença (DO - DA)	-4 972	-11 768	-5 239	-13 454	-5 109	-8 843	-49 386
Varição percentual (DO/DA) - 1	-6.52%	-14.72%	-6.87%	-16.88%	-6.69%	-10.63%	-10.47%

Estas melhorias indicam, indiretamente, uma redução significativa no consumo e no desgaste dos veículos inerentes à recolha dos resíduos urbanos.

Tabela V –Diferença das distâncias (em metros) percorrida por cada veículo

		Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
Atual	Veículo 1	43 490	47 360	42 630	45 610	42 990	48 910
	Veículo 2	32 810	32 560	33 590	34 100	33 420	34 250
Otimizado	Veículo 1	35 215	36 321	31 507	34 979	32 869	36 932
	Veículo 2	36 112	31 831	39 474	31 277	38 432	37 385
Diferença Atual	 V1-V2 	10 680	14 800	9 040	11 510	9 570	14 660
Diferença Otimizado	 V1-V2 	897	4 490	7 967	3 702	5 563	453

Uma interessante comparação que pode ser feita individualmente entre os dois circuitos atuais e os dois circuitos otimizados, é a diferença da distância percorrida entre os veículos como se analisa na Tabela V.

Observando-se que para os vários dias da semana, a diferença das distâncias percorridas entre os dois veículos é menor, mostrando que os percursos otimizados para além de mais curtos também são mais equilibrados entre os dois veículos, para que este equilíbrio seja verificado, repara-se que em dias como a segunda-feira e o sábado, por exemplo, vai existir um veículo que vai aumentar ligeiramente a distância percorrida para esse dia, e um outro que terá uma diminuição significativa, equilibrando-se entre si.

O mesmo equilíbrio verifica-se na diferença do total de resíduos recolhidos durante a semana. Sendo que no circuito atual constata-se uma diferença de 4223 Kg entre as cargas dos dois circuitos e com o circuito otimizado calcula-se uma diferença de 1279 Kg.

Capítulo 7. Conclusão

O problema desenvolvido, juntamente com a Câmara Municipal de Oeiras, enquadra-se num problema de roteamento de veículos com procura nos nodos (VRP).

Este estudo teve como objetivo principal a identificação de circuitos de recolha de resíduos sólidos na Câmara Municipal de Oeiras (CMO), minimizando o tempo de recolha, desde a garagem até o Centro de Recolha e Tratamento de Resíduos Sólidos da TratoLixo.

Os resultados foram apresentados numa base diária para fazer a comparação com os circuitos estipulados pela CMO.

Após a recolha e tratamento de dados, a análise dos resultados aponta para que o tempo médio de recolha pode ser melhorado se se recorrer à metodologia utilizada.

Os circuitos encontrados diferem do percurso atual, como esperado, satisfazendo, os requisitos identificados. Os percursos têm início e um fim num depósito passam por todos os pontos de recolha estipulados pelo Departamento de Resíduos Sólidos Urbanos e são compatíveis com as capacidades dos veículos e com os tempos de trabalho disponíveis pela tripulação.

O modelo definido revela resultados positivos, valores esses que chegam a traduzir uma melhoria que ronda os 10% na distância total percorrida e os 13% no tempo total despendido. Mais propriamente, 50 quilómetros semanais, apenas, nos dois circuitos estudados.

Assim, se optassem pelos novos circuitos diários definidos pela formulação a CMO melhoraria. Por outro lado, o tempo disponível (folgas) não despendido pelos recursos humanos pode ainda permitir uma melhor alocação de recursos humanos.

Por outro lado, as ferramentas e os modelos criados, permitem a determinação de rotas para a recolha dos resíduos urbanos em pouco tempo. Trata-se portanto, de um método mais eficaz e eficiente, face ao que corresponderia a alguém que tivesse que redefinir as rotas manualmente. O método proposto recorre a modelos matemáticos que procuram o menor tempo de recolha, tendo em conta recursos limitados, por exemplo o tempo de turno de trabalho. Neste estudo foram determinados dois circuitos de recolha, no menor tempo possível, para todos os dias de uma semana.

Importante frisar que se trata de um modelo que visa ajudar na tomada de decisão, pois nem sempre o ótimo teórico é satisfatório na prática. São variadas as razões quer do ponto de vista da empresa, quer de responsáveis, de trabalhadores, nomeadamente os motoristas. A solução pode, por exemplo, conter um trajeto que o motorista não consegue realizar ou prefere evitar devido a manobras arriscadas ou de difícil execução. Os resultados dos modelos devem pois poder ser ajustados ao caso real em que se enquadram.

Bibliografia

Baptista, S., Oliveira, R.C. & Zúquete, E., 2002. Discrete Optimization - A period vehicle routing case study. *European Journal of Operational Research* 139, pp.220-229.

Beasley, J.E., 1983. Route-first cluster-second methods for vehicle routing. *Omega* 11, pp.403-408.

Brandão, J. & Eglese, R., 2008. A deterministic tabu search algorithm for the capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research* 35, pp.1112-1126.

Corberán, A. & Prins, C., 2010. Recent Results on Arc Routing Problems: An Annotated Bibliography. *Networks* 56, pp.49-69.

Dantzig, G., Fulkerson, R. & Johnson, S., 1954. Solution of a large-scale Traveling-Salesman Problem. *The Rand Corporation, Santa Monica*, pp.393-410.

Dantzing, G.B. & Ramser, J.H., 1959. The Truck Dispatching Problem. *Management Science* 6, pp.80-91.

Dror, M., 2000. *Arc Routing: Theory solutions and applications*. Kluwer Academic Publishers.

Edmonds, J. & Johnson, E.L., 1972. Matching, Euler Tours and the Chinese Postman. *Mathematical Programming* 5, pp.88-124.

Eiselt, H.A., Gendreau, M. & Laporte, G., 1995a. Arc routing problems. Part I: The Chinese postman problem. *Operations Research* 43, pp.231-242.

Eiselt, H.A., Gendreau, M. & Laporte, G., 1995b. Arc routing problems. Part II: The rural postman problem. *Operations Research* 43, pp.399-414.

Erkut, E. & Maclean, D., 1992. Alberta's Energy Efficiency Branch Conducts Transportation Audits. *Interfaces* 22, pp.15-21.

Euler, L., 1953. Leonard Euler and the Konigsberg Bridges. *J.R. Newman, Scientific American* 189, pp.66-70.

Golden, A.A. & Assad, B.L., 1995. Arc routing methods and Applications. *Handbooks in Operations Research and Management Science* 8, Chapter 5, Elsevier Science B.V., pp.375-483.

Golden, B.L. & Wong, R.T., 1981. Capacitated arc routing problems. *Networks* 11, pp.305-315.

Gribkovskaia, I., Halskau, O. & Laporte, G., 2005. *The Bridges of Konigsberg - A historical Perspective*. [Online] Available at: <http://kursinfo.himolde.no/lo-kurs/lo904/Laporte/BridgesPaper.pdf> [Accessed 13 September 2013].

Guan, M., 1962. Graphic Programming Using Odd and Even Points. *Chinese Mathematics* 1, pp.273-277.

Hertz, A., Laporte, G. & Mittaz, M., 2000. A tabu search heuristic for the capacited arc routing problem. *Operational Research* 48, pp.129-135.

Lenstra, J. K. & Rinnooy-Kan, A.H.G., 1976. On General Routing Problems. *Networks* 6, pp. 273-280.

Lacomme, P., Prins, C. & Sevaux, M., 2006. A genetic algorithm for a bi-objective capacited arc routing problem. *Computer Operation Research* 33, pp.3473-3493.

Livi, L. & Rizzi, A., 2013. Graph Ambiguity. *Fuzzy Sets and Systems* 221, pp.24-47.

Longo, H., Poggi, M. & Uchoa, E., 2006. Solving capacited arc routing problems using a transformation to the CVRP. *Operation Research* 33, pp.1823-1837.

Maniezzo, V. & Roffilli, M., 2008. Algorithms for large directed capacited arc routing instances: Urban solid waste collection operational support. Recent Advances in evolutionary computation for combinatorial optimization, C. Cotta and J. Van Hemert (Editors), *Studies in Computational Intelligence* 153, *Springer*, pp.259-274.

Mei, Y., Tang, K. & Yao, X., 2009. A Global Repair Operator for Capacited Arc Routing Problem. *IEEE* 39, pp.723-734.

Potvin, J.Y. & Bengio, S., 1996. The vehicle routing Problem with time windos part ii: Genetic Search. *Inform Journal on Computing* 8, pp.165-172.

Potvin, J.Y., Kervahut, T., Garcia, B.L. & Rousseau, J.M., 1996. The vehicle routing problem with time windows part i: Tabu Search. *Inform Journal on Computing* 8, pp.158-164.

Sahoo, S. et al., 2005. Routing Optimization for Waste Management. *Interfaces* 35, pp.24-36.

Saiyed, A.R., 2012. *The Traveling Salesman problem*. Indiana State University, pp.1-15.

Solomon, M., Chalifour, A., Desrosiers, J. & Boisvert, J., 1992. An Application of Vehicle-Routing Methodology to Large-Scale Larvicide Control Programs. *Interfaces* 22, pp.88-99.

Toth, Paolo & Vigo, Daniel, 2002. The Vehicle Routing Problem. *SIAM*, pp.1-367

Teixeira, J., Antunes, A.P. & Sousa, J.P., 2004. Recyclable waste collection planning - a case study. *European Journal of Operational Research* 158, pp.543-554.

Timlin, M.T.F. & Pulleyblank, W.R., 1992. Precedence Constrained Routing and Helicopter Scheduling: Heuristic Design. *Interfaces* 22, pp.100-111.

Ulusoy, G., 1985. The fleet size and mix problem for capacitated arc routing. *European Journal of Operational Research* 22 , pp.329-337.

Karp, R.M., 1972. Reducibility Among Combinatorial Problems. *University of California at Berkeley*, pp.85-103.

**PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DE CIRCUITOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS NA CÂMARA MUNICIPAL DE OEIRAS**

Ricardo Jorge Alves Fortunato

Anexo

Tabela VI - Constituição dos pontos de recolha por *clusters*

<i>Cluster</i>	Freguesia	Pontos de recolha
1	Laceia	Rua 5 de Outubro
	Barcarena	Rua Bartolomeu da Costa
	Barcarena	Rua 5 de Outubro/Rua Dom Manuel I
	Tercena	Praceta Movimento das Forças Armadas
2	Caxias	Rua Angelique Roblle Barata
	Caxias	Rua Leocádio Pórcio
	Caxias	Rua Marcela Pires Messias
	Caxias	Largo Alves Redol
	Pedreira Italiana	Rua de Quartzo (Rotunda)/Rua da Pedreira Italiana
	Pedreira Italiana	Rua das Esmeraldas/Rua da Pedreira Italiana
	Pedreira Italiana	Rua de Milão
Pedreira Italiana	Rua de Milão (perto ao n.º 5)	
3	Queluz	Rua António Aleixo/Rua Tony de Matos
	Queluz	Rua Professor Dr. Jorge Mineiro
	Queluz	Rua Soeiro Pereira Gomes
	Queluz	Rua Alfredo Inácio Ramos da Silva
	Queluz	Rua Guerra Junqueiro
	Valejas	Rua Irene Isidro/Alameda Quinta de Valejas
	Valejas	Alameda Quinta de Valejas
4	Queijas	Rua João XXI (CAIQUEL)
	Queijas	Rua Ramalho Ortigão
	Queijas	Estrada das Várzeas
	Linda-a-Pastora	Av. Tomás Ribeiro (Junto ao Café)
	Linda-a-Pastora	Quinta de Nossa Senhora da Rocha
5	Carnaxide	Praceta António Aleixo
	Carnaxide	Praceta António Aleixo
	Carnaxide	Praceta António Aleixo
	Carnaxide	Centro Cívico
	Carnaxide	Rua Tenente General Zeferino Sequeira
	Carnaxide	Rua Eça de Queiroz
	Carnaxide	Rua Antero de Quental
	Carnaxide	Largo Frederico de Freitas
Carnaxide	Praceta Alvaro Ruas	
6	Miraflores	Rua Plácido Abreu/Av. Jaime Cortesão
	Miraflores	Rua Brito Pais/Av. Jaime Cortesão
	Miraflores	Av. 25 de Novembro (Escola)
	Miraflores	Av. 25 de Novembro
	Miraflores	Av. Jaime Cortesão n.º 23, 25, 27
	Miraflores	Av. Jaime Cortesão
	Miraflores	Alameda António Sérgio
	Miraflores	Rua Rodrigo Bessona Bastos
	Miraflores	Alameda António Sérgio (n.º 10)
	Miraflores	Alameda António Sérgio (n.º 14)
	Miraflores	Alameda António Sérgio (n.º 1)
	Linda-a-Velha	Av. Carolina Michaelis (pastelaria)
Linda-a-Velha	Av. Carolina Michaelis nº 20	
7	Linda-a-Velha	Av. 25 de abril n.º 20
	Linda-a-Velha	Largo Rui Pereira
	Linda-a-Velha	Largo Rui Pereira n.º 21

**PROBLEMA DE DETERMINAÇÃO DE CIRCUITOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS NA CÂMARA MUNICIPAL DE OEIRAS**

Ricardo Jorge Alves Fortunato

	Linda-a-Velha	Av. Tomás Ribeiro n.º 59, 61
	Linda-a-Velha	Largo Maria Lamas
	Linda-a-Velha	Largo Maria Lamas
	Linda-a-Velha	Av. D. Pedro V/Rua Gonçalves Crespo
	Linda-a-Velha	Avª D. Pedro V/Rua Dr. Gama Barros
	Linda-a-Velha	Rua Bernardo Santero
	Linda-a-Velha	Av. D. Pedro V - Café Flash
	Linda-a-Velha	Praceta António Enes
	Linda-a-Velha	Av. Tomás Ribeiro (frente ao n.º 21)
	Linda-a-Velha	Av. Tomás Ribeiro (junto ao coreto)
8	Paço de Arcos	Praia Velha
9	Dafundo	Rua Bento de Jesus Caraça
	Dafundo	Rua Clemente Vicente
	Dafundo	Rua Sacadura Cabral (junto ao Aquário)
	Dafundo	Rua Sacadura Cabral (junto à Quinta S. Mateus)
	Cruz-Quebrada	Rua São João de Deus, oposto ao n.º 11
	Cruz-Quebrada	Rua São João de Deus (junto ao café Snoopy)
10	Algés	Rua da Eira, frente ao n.º 67
	Algés	Rua da Eira, frente ao n.º 53
	Algés	Rua da Eira, frente ao n.º 39
	Algés	Rua do Almarjão
	Algés	Rua Quinta da Formiga (ao início)
	Algés	Rua Quinta da Formiga (ao fim)
	Algés	Rua Quinta da Formiga (ao meio)
	Algés	Rua Marcos Portugal/ Estrada Romeiras
	Algés	Rua José Duro/ Marcos Portugal
	Algés	Praceta dos Combatentes da Grande Guerra
	Algés	Calçada do Rio, n.º 11
	Algés	Calçada do Rio (junto ao café), n.º 31
	Algés	Calçada do Rio, n.º 41
	Algés	Largo Maria Leonor (início)
	Algés	Largo Maria Leonor (meio)
	Algés	Largo Maria Leonor (junto à escola)
	Miraflores	Escola de Miraflores
	Miraflores	Av. General Norton de Matos
	Algés	Praça Infante D. Pedro (lado da Rua Margarida Palla)
	Algés	Praça Infante D. Pedro (lado da Rua General Ferreira Martins)
	Algés	Rua Damião de Góis (frente ao Mc Donald´s)
	Algés	Rua Major Afonso Palla
	Algés	Alameda Hermano Patrone (junto à CIPOL)
	Algés	Av. Combatentes Grande Guerra (ao início)
	Algés	Av. Combatentes Grande Guerra (junto ao quiosque)
	Algés	Mercado de Algés/Rua Manuel Arriaga

Figura 8- Constituição dos pontos de recolha por *clusters*

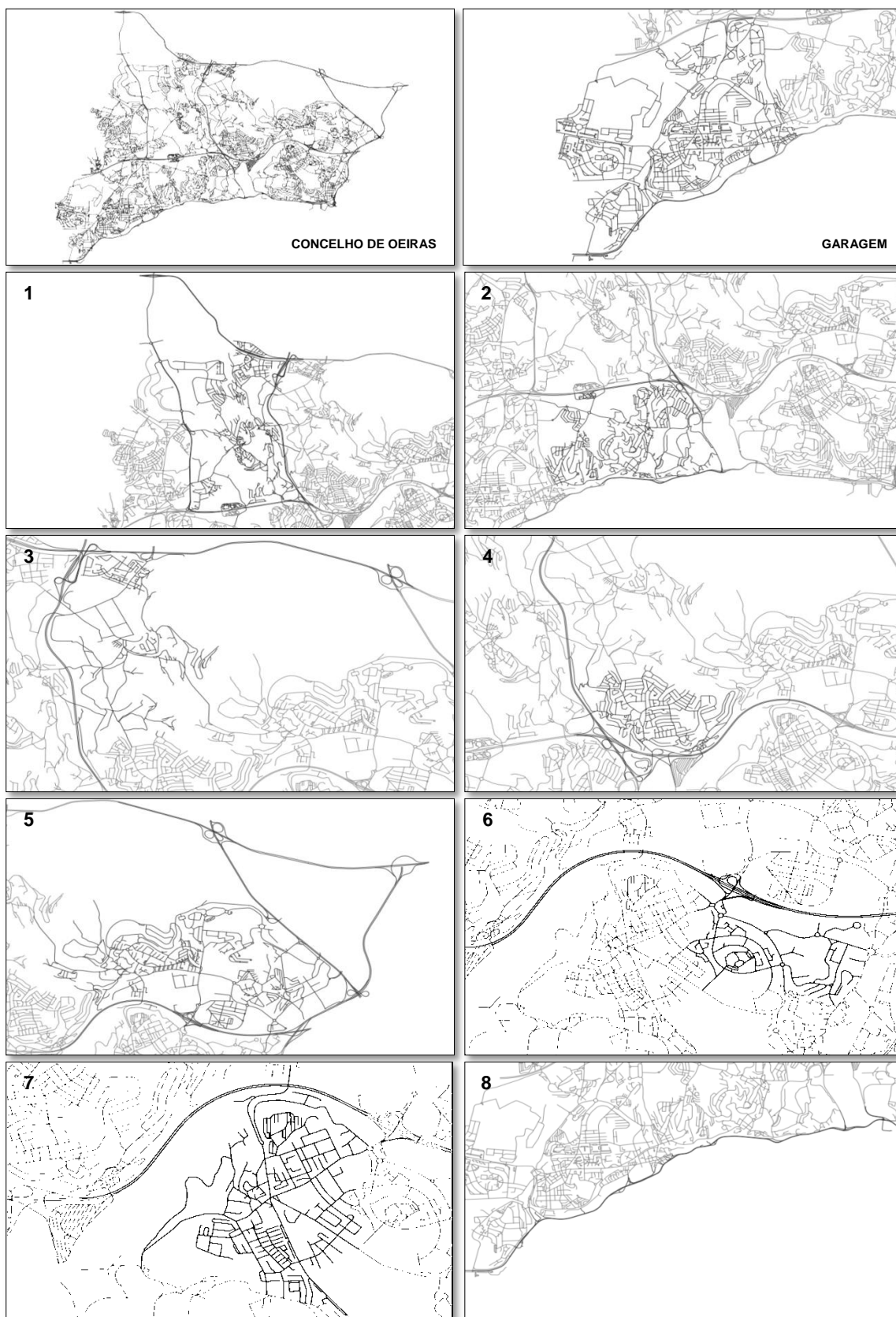


Figura 8 (continuação) - Constituição dos pontos de recolha por *clusters*



Figura 9 - Constituição dos pontos de recolha por *clusters*

