

RECONFIGURAÇÃO DA REDE LOGÍSTICA EM SISTEMAS  
DE RECOLHA DE RESÍDUOS

Gonçalo Santos Aguiar

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre em Gestão de Serviços e da Tecnologia

Orientadora:

Prof. Doutora Tânia Rodrigues Pereira Ramos, Prof. Auxiliar, Departamento de  
Engenharia e Gestão, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

setembro, 2016

## **Resumo**

A crescente preocupação com as questões relacionadas com a sustentabilidade, a par do estabelecimento de metas europeias a cumprir pelos sistemas de gestão de resíduos, tem levado as entidades responsáveis pela recolha dos resíduos a estudarem novas alternativas à configuração atual dos seus sistemas.

Esta problemática, associada à elevada ineficiência deste tipo de sistemas, levou ao estudo da reconfiguração da rede logística da Valorsul, empresa responsável pela recolha de resíduos recicláveis na zona Oeste. A rede logística atual é baseada num único depósito e propõe-se a utilização das estações de transferência já existentes como novos depósitos. Para além de introduzir novos depósitos na rede logística, foi estudada também uma alteração à tipologia das rotas de recolha a realizar, ou seja, realizar simultaneamente rotas abertas (rotas que começam num depósito e terminam num depósito diferente) e fechadas (rotas que iniciam e têm fim no mesmo depósito).

Os resultados permitiram concluir que, para a recolha de papel/cartão, é possível reduzir em 47% a quilometragem percorrida pelos veículos, bem como diminuir em 9,5% o tempo efetuado por estes no período de um mês. Estes resultados têm impacto nos custos, ao permitir poupar consideravelmente nas horas pagas aos colaboradores.

**Palavras-chave:** rede logística; gestão de resíduos; rotas de veículos; múltiplos depósitos.

### **JEL Classification System:**

**L920** –Railroads and Other Surface Transportation

**R410** - Transportation: Demand, Supply, and Congestion; Travel Time; Safety and Accidents; Transportation Noise

## **Abstract**

The growing concern with issues related to sustainability, alongside to the establishment of European targets that have to be met by waste management systems, has led the authorities responsible for the collection of waste to consider new alternatives to the current configuration of their systems.

This problem led to the study of the reconfiguration of Valorsul's logistics network, the one responsible for the collection of recyclable waste in the western zone of Portugal. The current logistics network is based on a single depot and in this study it is proposed the use of existing transfer stations as new depots. In addition, it is also studied a change in the type of collection of routes to perform, i.e., do simultaneously open routes (routes that start in a depot and end on a different one) and closed routes (routes that begin and end in the same depot).

The results showed that, for the collection of paper/cardboard, it is possible to reduce by 47% the mileage traveled by vehicles, and decrease by 9.5% the time made by them. These results have an impact on costs, in a way that it is possible to save considerably in hours paid to employees.

**Keywords:** logistics network; vehicle routing; waste management, multiple depots.

### **JEL Classification System:**

**L920** –Railroads and Other Surface Transportation

**R410** - Transportation: Demand, Supply, and Congestion; Travel Time; Safety and Accidents; Transportation Noise

## **Agradecimentos**

Em primeira instância gostaria de agradecer à professora Tânia Ramos, que desde cedo me deu um voto de confiança e autonomia para desenvolver este estudo. A disponibilidade nos momentos mais importantes foi essencial para levar esta dissertação a bom porto.

Aos meus amigos que acompanharam, ajudaram e intervieram diretamente neste projeto pessoal.

Aos meus amigos que me permitiram descontrair e a manter o meu foco nos meus objetivos.

E, por último, à minha família que com experiência e apoio me proporcionou a possibilidade de atravessar esta fase acadêmica com sucesso.

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Enquadramento geral.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Problemática.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>1.3 Objetivos do estudo.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1.4 Estrutura da dissertação .....</b>                                       | <b>5</b>  |
| <b>2. Fundamentação teórica .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2.1 Logística inversa.....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2.2 Reciclagem e a gestão de resíduos recicláveis.....</b>                   | <b>9</b>  |
| <b>2.3 Vehicle Routing Problem (VRP).....</b>                                   | <b>10</b> |
| 2.3.1 Métodos de solução.....   | 12        |
| 2.3.2 Variantes do VRP .....  | 14        |
| <b>3. Metodologia .....</b>   | <b>19</b> |
| <b>4. Modelo proposto.....</b>  | <b>22</b> |
| <b>4.1 Fase 1 – Determinação das rotas (sem restrições temporais) .....</b>     | <b>23</b> |
| <b>4.2 Fase 2 – Avaliação da duração das rotas determinadas.....</b>            | <b>27</b> |
| <b>4.3 Fase 3 – Ajuste da duração das rotas (com restrições temporais).....</b> | <b>29</b> |
| <b>5. Caso de estudo .....</b>  | <b>30</b> |
| <b>5.1 Valorsul.....</b>  | <b>30</b> |
| 5.1.1 Descrição do processo de recolha .....                                    | 31        |
| 5.1.2 Infraestruturas .....   | 31        |
| 5.1.3 Ecopontos.....  | 31        |
| 5.1.4 Frota de veículos .....   | 32        |
| 5.1.5 Circuitos.....  | 33        |
| <b>5.2 Cenários de melhoria.....</b>  | <b>34</b> |
| <b>6. Tratamento de dados .....</b>   | <b>37</b> |
| <b>6.1 Resíduos a recolher .....</b>  | <b>37</b> |
| 6.1.1 Densidade.....  | 38        |
| <b>6.2 Pontos de recolha .....</b>  | <b>39</b> |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 6.2.1      | Quantidade a recolher por ponto de recolha .....        | 40        |
| <b>6.3</b> | <b>Frequência de recolha.....</b>                       | <b>41</b> |
| <b>6.4</b> | <b>Tempo de circuito .....</b>                          | <b>44</b> |
| <b>6.5</b> | <b>Distâncias .....</b>                                 | <b>44</b> |
| 6.5.1      | Distâncias dentro das freguesias .....                  | 44        |
| 6.5.2      | Distâncias entre freguesias.....                        | 46        |
| <b>6.6</b> | <b>Veículos de recolha .....</b>                        | <b>46</b> |
| <b>6.7</b> | <b>Conclusões .....</b>                                 | <b>47</b> |
| <b>7.</b>  | <b>Análise de resultados .....</b>                      | <b>48</b> |
| <b>7.1</b> | <b>Cenários considerados.....</b>                       | <b>48</b> |
| 7.1.1      | Cenário atual .....                                     | 49        |
| 7.1.2      | Análise de sensibilidade.....                           | 62        |
| 7.1.3      | Resultados computacionais.....                          | 65        |
| <b>8.</b>  | <b>Discussão de resultados .....</b>                    | <b>67</b> |
| <b>9.</b>  | <b>Conclusões e perspetivas futuras.....</b>            | <b>70</b> |
| <b>9.1</b> | <b>Perspetivas futuras.....</b>                         | <b>72</b> |
|            | <b>Referências bibliográficas .....</b>                 | <b>74</b> |
|            | <b>Anexos .....</b>                                     | <b>80</b> |
|            | <b>Anexo 1 - Numero de ecopontos por freguesia.....</b> | <b>80</b> |
|            | <b>Anexo 2 - Áreas de intervenção .....</b>             | <b>82</b> |
|            | <b>Anexo 3 – Rotas a efetuar no cenário I .....</b>     | <b>83</b> |
|            | <b>Anexo 4 – Rotas a efetuar no cenário II.....</b>     | <b>83</b> |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxo básico de logística inversa (Agrawal <i>et al.</i> , 2015)..... | 7  |
| Figura 2 - Diferença entre <i>single depot</i> e <i>multi-depot</i> . ....       | 16 |
| Figura 3 – Ilustração do problema MDVRP-MCO (Ramos <i>et al.</i> , 2013).....    | 18 |
| Figura 4 - Metodologia para resolução de um problema de otimização.....          | 19 |
| Figura 5 - Fluxograma do processo de determinação de rotas.....                  | 22 |
| Figura 6 - Área de intervenção da Valorsul (Valorsul, 2016).....                 | 30 |
| Figura 7 – Localização do depósito no cenário atual.....                         | 36 |
| Figura 8 – Localização dos depósitos nos cenários I e II. ....                   | 36 |
| Figura 9 - Exemplo da aplicação da heurística na Fase 3.....                     | 51 |
| Figura 10 - Áreas de influências dos depósitos A, B, C no cenário I.....         | 53 |
| Figura 11 - Áreas de influências dos depósitos D, E, F no cenário I.....         | 54 |
| Figura 12 - Área de influência do depósito G no cenário I.....                   | 54 |
| Figura 13 - Áreas de influências dos depósitos A, B e C no cenário II.....       | 58 |
| Figura 14 - Áreas de influências dos depósitos D, E e F no cenário II.....       | 58 |
| Figura 15 - Área de influência do depósito G no cenário II. ....                 | 59 |

## Índice de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Comparação entre as metas do PERSU 2020 e valores atingidos em 2012. ...               | 3  |
| Tabela 2 - Lista de veículos disponíveis da Valorsul. ....  | 33 |
| Tabela 3 - Densidade do papel/cartão para cada rota. ....   | 39 |
| Tabela 4 - Resultados obtidos da densidade do papel/cartão. ....                                  | 39 |
| Tabela 5 - Nível de enchimento do ecoponto 2. ....  | 40 |
| Tabela 6 - Alocação das frequências aos contentores. ....   | 42 |
| Tabela 7 - Número de freguesias alocadas a cada frequência no cenário I. ....                     | 43 |
| Tabela 8 - Definição de frequências no cenário II – exemplo da freguesia 2. ....                  | 43 |
| Tabela 9 - Número de freguesias alocadas a cada frequência no cenário II. ....                    | 43 |
| Tabela 10 - Distância entre freguesias por rota. ....   | 45 |
| Tabela 11 - Densidade que esgota ambas as capacidades dos veículos. ....                          | 46 |
| Tabela 12 - Limite máximo de capacidade em peso dos veículos. ....                                | 47 |
| Tabela 13 - Resultados totais no cenário atual. ....  | 49 |
| Tabela 14 - Número de rotas sujeitas à heurística de melhoria no cenário I. ....                  | 50 |
| Tabela 15 - Resultados por frequência no cenário I. ....  | 51 |
| Tabela 16 – Número de rotas abertas e fechadas no cenário I. ....                                 | 51 |
| Tabela 17 - Exemplos de rotas abertas no cenário I. ....  | 52 |
| Tabela 18 - Resultados totais no cenário I. ....  | 53 |
| Tabela 19 - Número de rotas sujeitas à heurística de melhoria no cenário II. ....                 | 55 |
| Tabela 20 - Resultados por frequência no cenário II. ....   | 56 |
| Tabela 21 - Número de rotas abertas e fechadas no cenário II. ....                                | 56 |
| Tabela 22 - Resultados totais no cenário II. ....   | 57 |
| Tabela 23 - Comparação de resultados mensais entre o cenário atual e os cenários I e II.<br>..... | 60 |
| Tabela 24 - Variação de resultados mensais dos cenários I e II face ao cenário atual. ..          | 60 |



|   |    |
|---|----|
| Tabela 25 - Pressupostos do cálculo da poupança efetuada. ....                                      | 61 |
| Tabela 26 - Resultados mensais da análise de sensibilidade. ....                                    | 62 |
| Tabela 27 - Variação de resultados mensais da análise de sensibilidade face ao cenário I.<br>.....  | 62 |
| Tabela 28 - Resultados por freguesias agregadas .....   | 64 |
| Tabela 29 - Número de rotas abertas e fechadas com frequências agregadas. ....                      | 64 |
| Tabela 30 - Resultados totais com freguesias agregadas. ....  | 65 |
| Tabela 31 - Variação de resultados entre o cenário I e o cenário com frequências<br>agregadas. .... | 65 |
| Tabela 32 - Resultados computacionais obtidos para os cenários I e II. ....                         | 65 |
| Tabela 33 - Resultados computacionais para a análise sensibilidade efetuada ao cenário<br>I. ....   | 66 |
| Tabela 34 - Número de contentores alocados a cada freguesia. ....                                   | 82 |
| Tabela 35 - Área de intervenção de cada depósito. ....  | 82 |
| Tabela 36 - Rotas a efetuar no cenário I nas diferentes frequências.....                            | 83 |
| Tabela 37 - Rotas a efetuar no cenário II nas diferentes frequências. ....                          | 83 |

## 1. Introdução

### 1.1 Enquadramento geral

A industrialização permitiu às organizações alterarem a sua forma de produzir, trocando as pequenas quantidades pelo fabrico em massa. Este incremento da produção, a par do aumento acentuado de população, levou à intensificação do consumo de bens (Hinshaw e Stearns, 2014). Este fenómeno despoletou na sociedade alguma apreensão relativamente à sustentabilidade dos recursos e matérias-primas, na medida em que ambos começaram a ser consumidos mais rapidamente do que eram formados.

O crescente consumo de produtos provocou, conseqüentemente, o aumento exponencial da produção de resíduos que, por sua vez, veio influenciar a forma como as organizações responsáveis pela gestão dos resíduos produzidos têm encarado este problema. Numa primeira fase, a rapidez de resposta e os menores custos associados à mesma levaram as organizações a optarem pelo despejo massivo dos resíduos em aterros sanitários. A insustentabilidade desta resolução, bem como a imposição de normas europeias, levou à mudança do foco para a reciclagem dos resíduos. O conseqüente aumento exponencial do número de pontos de recolha seletiva – acréscimo de 325% entre 2000 e 2011 (APA, 2013), a nível nacional - incitou a necessidade de as organizações redesenharem os seus processos logísticos, de forma a tornar economicamente viável o processo de recolha e tratamento dos resíduos: disponibilização de mais recursos, como novas instalações de tratamento e uma maior frota de veículos. Neste seguimento, a maior fatia dos custos de manutenção de uma rede logística desta natureza apoia-se na fase de recolha e de transporte dos resíduos – cerca de 80% (Clark e Gillean, 1975; Or e Curi, 1993) –, levando as organizações a procurarem a otimização do desenho das rotas de recolha efetuadas.

O foco a longo prazo, através das questões ambientais e sociais, e no presente, através da importância dos custos associados, tornam-se indissociáveis. É, assim, adequado estudar novas formas de aumentar a eficiência do processo de recolha de resíduos, integrando melhor as várias atividades existentes e a sustentabilidade neste processo.

A avaliação do sistema com maior produção de resíduos em Portugal – a Valorsul –, numa altura em que existe a necessidade de cumprimento de metas estabelecidas pela Europa, torna-se uma oportunidade de real importância, na medida em que a otimização do mesmo revela um enorme potencial de extrapolação do estudo a outras empresas do sector.

Na indústria da gestão de resíduos, Portugal encontra-se dividido em diversos sistemas integrados de gestão de resíduos, diferenciando entre si o tipo de resíduo e a entidade responsável pelo mesmo: embalagens (nomeadamente vidro, papel/cartão e plástico/metal), produtos eletrónicos, pneus, veículos, pilhas e óleos. A nível das embalagens, o sistema em que estão inseridas é o SIGRE – Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagens –, sendo que a entidade responsável pela sua gestão é a Sociedade Ponto Verde (SPV).

Cruz *et al.* (2012) descreve e figura o processo de resíduos de embalagens em Portugal, bem como a sua viabilidade económica. Operacionalmente, os produtos após terem sido colocados no mercado são adquiridos pelo consumidor final que, posteriormente, os separa por tipo de material, colocando-os nos respetivos contentores. De seguida, os municípios e as empresas responsáveis recolhem e triam os resíduos de forma seletiva, disponibilizando-os à SPV que vai encaminhá-los para a reciclagem e respetiva valorização (SPV, 2016).

Financeiramente, as empresas que colocam produtos no mercado pagam um valor à SPV, mediante o peso e o tipo do material em questão, para esta efetuar a valorização dos mesmos. Através das receitas obtidas, a SPV ajuda as empresas responsáveis pela recolha, participando nos custos dessa mesma recolha e triagem (SPV, 2016).

O valor que é compartilhado tem em conta um sistema eficiente e otimizado. Nesta medida, as empresas responsáveis pela recolha não podem desenvolver e atuar num sistema ineficaz, sob pena de estarem a acarretar custos que não são cobertos pela SPV. Assim, é importante rever constantemente as manobras operacionais e táticas que levam a uma maior eficiência do sistema.

A par disto, o crescimento do consumo na quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados em Portugal ao longo dos anos – aumento de 82% entre 1990 e 2010, ainda que haja um decréscimo em 14% entre 2010 e 2014 devido à conjuntura económica (Eurostat, 2016) – levou à criação de metas que fossem ao encontro da conciliação entre questões de sustentabilidade financeira e ambiental.

Foram assim determinadas medidas a nível europeu e nacional, que impulsionaram a construção de novas infraestruturas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos e a amplificação da rede contentores de recolha de resíduos recicláveis, para satisfazer a necessidade de aumentar a quantidade de resíduos reciclados. As lixeiras foram

substituídas pelos aterros sanitários, que, ainda assim, continuaram a ser uma solução insustentável a nível ambiental. Novas diretivas surgiram, incentivando outras formas de tratamento, como a recuperação energética e a reciclagem (UNEP, 2013; PERSU 2020, 2014).

Atualmente, a nível nacional, cada região está abrangida por uma entidade diferente responsável pela recolha dos resíduos. No total existem 23 sistemas, dos quais 12 são multimunicipais e 11 intermunicipais. Estes sistemas no seu conjunto têm de atingir as metas nacionais apresentadas na Tabela 1, de forma a aumentar a eficiência do sistema e ir de encontro com as preocupações europeias.

|  | Metas 2020 | 2012 |
|--|------------|------|
| Preparação para reciclagem e recuperação de resíduos | >50%       | 24%  |
| Depósito de resíduos urbanos em aterro               | 10% - 50%  | 63%  |
| Reutilização de resíduos de embalagens               | 70% - 80%  | 63%  |

Tabela 1 - Comparação entre as metas do PERSU 2020 e valores atingidos em 2012.

No caso da Valorsul, a necessidade de ir de encontro rapidamente às metas impostas impossibilitou o foco imediato nos custos acrescidos com a ampliação da rede de pontos de recolha diferenciada. Sabendo ainda que os valores de preparação de resíduos para a reciclagem têm de aumentar, maior terá de ser a aposta neste tipo de recolha, levando à necessidade de otimização deste sistema.

## 1.2 Problemática

O estudo retratado na presente dissertação incide sobre o sistema logístico adotado pela Valorsul. A elevada dimensão desta empresa permite uma maior clareza na observação de possíveis reduções de custos e de melhorias na eficiência do sistema.

No sistema logístico em análise, as decisões do domínio estratégico estão tomadas, isto é, o número e localização de Estações de Triagem, Estações de Transferência, Bases de veículos (também denominados por Depósitos), Contentores e Veículos em circulação estão definidos. Ainda assim, o estudo incide na possibilidade de aproveitamento das Estações de Transferência, como novos Depósitos (bases de veículos), de modo a analisar a hipótese de redução de custos de transporte através da redistribuição mais equitativa dos depósitos pela área de intervenção da Valorsul. Partindo deste princípio, são delineadas as questões do domínio tático, como o desenho de novas rotas, tendo em conta

múltiplos depósitos e não apenas um, como atualmente acontece. Num cenário com múltiplos depósitos, também se estudará a hipótese de realização de rotas abertas, ou seja, rotas que começam num depósito e terminam num depósito diferente.

O problema mais clássico de desenho de rotas de veículos é amplamente estudado junto da comunidade científica nas mais diversas indústrias, mas a falta de sofisticação dos modelos que atualmente suportam a decisão dos gestores de rotas e de pessoal dificultam a eficácia e eficiência da resposta à elevada procura existente (Hannan *et al.*, 2015). Por um lado, alguns modelos ainda simplistas incitam a ineficiência das rotas estabelecidas e problemas a nível da sustentabilidade social, quer a nível dos clientes (falta de uniformização no serviço), quer a nível dos condutores dos veículos pela sua instabilidade na carga horária que apelam à padronização das rotas (Den Boer, 2007; Montoya-Torres 2015). Por outro lado, os modelos atuais mais complexos são ineficientes quando se tratam de grandes quantidades de informação, sendo dificultada a tarefa de desenho de rotas diárias que têm por base a previsão de volume de resíduos a recolher.

### 1.3 Objetivos do estudo

Torna-se necessário estudar possíveis soluções para uma das maiores problemáticas das empresas que atuam na recolha dos resíduos – a otimização do processo de recolha através da redução de custos e tempos de transporte.

Desta forma, a presente dissertação tem como principal objetivo estudar a reconfiguração e analisar a capacidade de otimização de um sistema atualmente caracterizado por um único depósito, através da aplicação de um modelo de rotas que permite a realização de rotas abertas e fechadas numa rede de recolha com múltiplos depósitos – problema MDVRP-MCO (*multi-depot vehicle routing problem with mixed closed and open routes*).

A avaliação do cumprimento do objetivo de otimização passa pela definição de alguns indicadores que vão permitir comparar os cenários a criar, bem como de alguns objetivos intermédios. Estes objetivos englobam:

- A definição de *clusters* que organizem os contentores individuais em pontos de recolha a coletar;
- A determinação das áreas de intervenção de cada depósito considerado;
- O estabelecimento das rotas a realizar para satisfazer por completo as necessidades de recolha existentes e o tempo e quilómetros respetivos.

#### 1.4 Estrutura da dissertação

De forma a dar resposta à problemática do estudo apresentado na corrente dissertação, é apresentada de seguida a estrutura organizativa adotada:

**Capítulo 2 - Fundamentação teórica:** revisão de conceitos e modelos teóricos desenvolvidos no seio da comunidade científica sobre a temática, de forma a dar sustento ao estudo a ser desenvolvido. A revisão incidir-se-á em tópicos de relevo como a logística inversa e a sua importância; a gestão de resíduos e os principais custos associados à mesma; os problemas de rotas de veículos, as principais variantes e possíveis métodos de resolução.

**Capítulo 3 - Metodologia:** descrição dos dados e do tipo de informação que servem de base ao estudo, bem como dos métodos e processos utilizados para a análise e obtenção dos resultados do mesmo.

**Capítulo 4 - Modelo proposto:** descrição detalhada das fases do processo de obtenção de rotas, incluindo a formulação matemática do problema nas duas primeiras fases e definição da heurística utilizada na terceira fase.

**Capítulo 5 - Caso de estudo:** caracterização do sistema responsável pela recolha seletiva dos resíduos na zona Oeste – Valorsul; análise das infraestruturas e serviços que sustentam a rede e o modelo atualmente adoptado pela empresa; definição das restrições existentes na rede atual, bem como proposta de cenários alternativos que permitam contornar algumas destas restrições.

**Capítulo 6 - Tratamento de dados:** Tratamento e análise dos dados fornecidos pela empresa, de forma a obter os *inputs* necessários à aplicação do modelo estudado: como o cálculo da densidade do papel/cartão, estabelecimento de frequências e *clusters* de recolha.

**Capítulo 7 - Análise de resultados:** análise dos resultados obtidos e avaliação da otimização dos mesmos; análise de sensibilidade ao modelo.

**Capítulo 8 - Discussão de resultados:** análise dos resultados à luz da literatura estudada; principais limitações e vantagens do modelo estudado.

**Capítulo 9 - Conclusão e perspectivas futuras:** conclusões gerais do estudo, bem como definição de possíveis futuras investigações que permitam continuar o desenvolvimento da temática abordada.

## 2. Fundamentação teórica

O novo enquadramento competitivo incentivou as empresas a pensarem em novas formas de operar atingindo as metas propostas e situando-se na vanguarda em termos competitivos. Torna-se necessário olhar a evolução dos sistemas logísticos, por forma a serem criados outros novos, potencializando sistemas mais eficazes e eficientes. Num mundo onde o foco deixa de estar exclusivamente a curto prazo e a nível financeiro, são abraçados novos desafios relevantes na área da sustentabilidade quer ambiental, quer social.

### 2.1 Logística inversa

Diversos estudos têm vindo a ser desenvolvidos no domínio da logística inversa, onde diferentes autores apresentam definições distintas sobre o tema (Agrawal *et al.*, 2015). Historicamente, o tema começou por ser abordado nos anos 70, mas a formalização da definição foi apenas dada por Murphy e Poist (1989) ao mencionar o fluxo inverso de bens.

Na década de 90 o tema é estudado com mais detalhe e surgem novos conceitos, variando consoante a indústria estudada: Stock (1992) incluiu o papel da redução, reutilização, reciclagem e eliminação de materiais na atividade logística; Carter e Ellram (1998) introduziram a problemática ambiental no conceito de logística inversa ao proporem uma hierarquia com os conceitos estudados por Stock (1992), onde a redução da formação e a transformação dos resíduos toma um papel preponderante e a sua eliminação um papel secundário. Nesta medida, é possível analisar o peso da gestão de resíduos como base de estudo desta problemática.

Ainda assim, Rogers e Tibben-Lembke (1999) desenvolveram uma definição amplamente aceite pela comunidade científica – “a logística inversa é o processo de planear, implementar e controlar eficaz e eficientemente o fluxo de matérias-primas, produtos em vias de fabrico, produtos acabados e da informação integrada desde o ponto de consumo até ao ponto de origem, com o intuito da recuperação de valor ou de eliminação adequada”.

Mais tarde, Stock e Mulki (2009) defendem que uma melhor perceção do retorno dos produtos e uma gestão eficiente dos seus fluxos inversos podem conferir vantagem competitiva. Kannan *et al.* (2012a) reforçam que as organizações começaram a estender

a sua cadeia de logística direta, incluindo o fluxo inverso dos produtos como uma ferramenta estratégica para benefícios económicos e como complemento à sua imagem social.

A logística inversa inclui várias atividades-chave, visíveis na Figura 1.

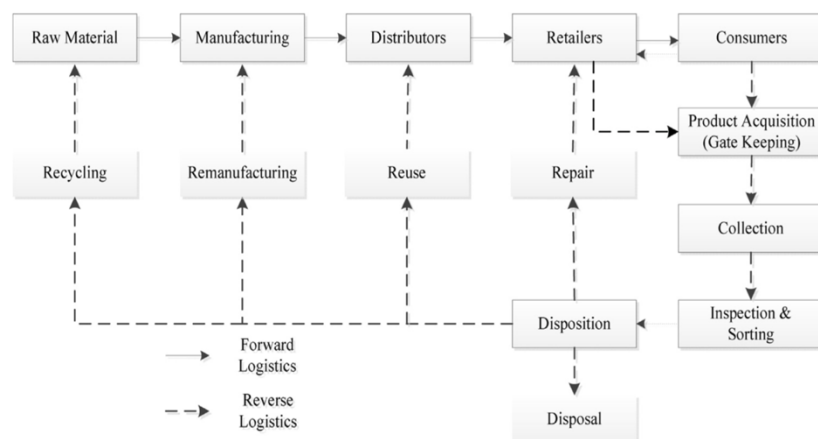


Figura 1 - Fluxo básico de logística inversa (Agrawal *et al.*, 2015).

Todas as cadeias de logística inversa têm início da fase de *Product Aquisition*, também defendida por muitos autores como a fase de recolha (Fleischmann *et al.*, 2000). Esta fase representa o momento de recuperação dos produtos, componentes ou materiais usados pelo consumidor (Guide e van Wassenhove, 2003b). Este defende ainda que esta primeira fase é crítica para garantir a eficiência e a rentabilidade da cadeia logística. A recuperação dos produtos deve ser gerida com base na qualidade, quantidade e tempo, de forma a evitar o caos da inesperada procura elevada. Nesta medida, é necessário que as empresas coordenem de forma eficaz o processo de recolha (Guide e van Wassenhove, 2003b).

Uma vez recolhidos, os produtos integram a fase de entrega dos produtos às instalações para inspeção (Blackburn, 2004). As atividades desta fase incluem o transporte e armazenamento, com os objetivos principais de minimização de custos e maximização do valor (Prahinski e Kocabasoglu, 2006). A gestão eficaz desta fase é crucial às empresas, para garantir que os custos totais de recuperação dos produtos não excedem o custo de produção de novos produtos ou materiais. Adicionalmente aos custos associados ao transporte e armazenamento, surge a necessidade de eficiência neste processo, uma vez que o valor associado ao produto esvanece à passagem do tempo (Guide e van Wassenhove, 2002).



Chegados às instalações devidas, os produtos são alvos de inspeção e triagem, de modo a identificar a qualidade do produto e selecionar a melhor estratégia de recuperação (Guide e van Wassenhove, 2002; Prahinski e Kocabasoglu, 2006). Ainda que os produtos sejam agrupados nesta fase pelas suas características, Guide e van Wassenhove (2002) defendem que para minimizar os custos e potencializar o valor dos produtos a separação e seleção dos mesmos deve ser realizada o mais cedo possível, de forma a distribuí-los e trata-los mais rapidamente.

Após a sua triagem, os produtos são separados, podendo ter diferentes destinos consoante o nível de intervenção necessária aos mesmos. Thierry *et al.* (1995) e Fleischmann *et al.* (1997) ilustram alternativas à eliminação dos produtos, podendo os materiais ser dispostos para reparação, reutilização, remanufactura ou reciclagem. Quanto maior a mudança estrutural aos produtos, mais atrás na cadeia o produto retorna ao fluxo logístico direto. Caso este não tenha qualquer possibilidade de reutilização, integra o sistema de gestão de resíduos para posterior deposição.

A implementação e gestão de uma cadeia de logística inversa requer às empresas investimentos em todas as atividades (Bodin e Sniezek, 2002). Ainda que, atualmente, as empresas não considerem a reutilização dos seus produtos o seu principal foco, a logística inversa é desenhada com o principal objetivo de redução dos custos associados à recuperação dos mesmos. Nesta medida, Kumar e Putman (2008) defendem que o primeiro passo para garantir a eficiência de uma cadeia logística inversa é a escolha do método de recolha mais apropriado.

Fleischmann *et al.* (1997) defendem um modelo ligeiramente distinto ao apresentado, em termos de organização das fases a percorrer. Este apresenta três fases principais – Planeamento da Distribuição Inversa, Gestão de Inventário e Planeamento de Produção – sendo a primeira a de maior contributo para os custos totais suportados. Nesta fase de planeamento são definidas as redes de distribuição e desenhados os modelos de localização de instalações nessas mesmas redes (*Network Design*). Neste contexto, a distribuição inversa surge como a recolha e transporte dos produtos acabados. As duas fases seguintes são respeitantes ao processo operacional de inserir estes produtos de novo na cadeia logística direta.

De Brito e Dekker (2002) alertam que a *performance* do processo de logística inversa está dependente da integração das decisões tomadas aos vários níveis hierárquicos: estratégico, tático e operacional – taxonomia de Ganeshan *et al.* (1999). Estes autores

defendem que como as decisões estratégicas são mais duradouras e de difícil mudança, cabendo aos níveis tático e operacional tomar decisões que possam aumentar a eficiência e eficácia, indo ao encontro das estratégias já definidas.

O nível estratégico inclui a decisão do tipo de recuperação dos produtos e o desenho da rede (*network design*), ou seja, o número de armazéns e outras infraestruturas, bem como os seus respetivos locais de instalação. No nível tático estão englobadas decisões relacionadas, por exemplo, com o modo de integração das várias atividades, áreas de atuação das instalações. Por último, o nível operacional preocupa-se com o detalhe das operações, na medida em que são definidos os horários e as rotas e é efetuado o devido controlo.

Desta forma, a logística inversa pode ser encarada como parte do desenvolvimento sustentável de uma empresa, dado que está a ser garantido que a sociedade usa e reutiliza eficiente e eficazmente todo o valor que é atribuído aos produtos.

No entanto, é importante diferenciar logística inversa de cadeia logística verde, visto que a última considera os aspectos ambientais em todas as atividades logísticas e especificamente na cadeia direta. A consciência ambiental é tida em conta não só momentaneamente, mas até ao final da vida do produto (Gungor e Gupta, 1999). Outros autores acrescentam medidas sustentáveis num sistema logístico verde, como a alteração do esquema de transporte para diminuir o consumo de combustível e os impactos ambientais, ou ainda a existência de edifícios também sustentáveis, ainda que a própria redução de custos seja também uma medida sustentável (Lin *et al.*, 2014).

Em suma, através da logística inversa torna-se possível a reutilização de produtos. No entanto, em casos em que o período de vida útil do produto termina, estes deixam de ter propósito, sendo considerados resíduos, originando assim um novo ciclo denominado de gestão de resíduos, que se foca na recolha e processamento destes de forma eficiente e eficaz. Esta gestão permite restaurar algum do valor perdido e, através de um sistema de logística inversa, permite posteriormente a integração do produto/resíduo numa nova cadeia logística (De Brito e Dekker, 2002).

### **2.2 Reciclagem e a gestão de resíduos recicláveis**

O aumento da produção de resíduos e das preocupações ambientais, bem como a crescente urbanização dos países ocidentais, conduziu a um crescente interesse nos

transportes da zona urbana. A imensa emissão de gases e aumento dos pontos de recolha, para incentivar a reciclagem, têm motivado a formulação de rotas que satisfaçam os clientes de forma eficiente. Neste sentido, os objetivos dos estudos na área passam pela redução do impacto ambiental, do número de veículos em operação, dos tempos de viagem ou ainda da distância percorrida pelos veículos.

Diversos estudos têm vindo a ser efetuados em diferentes realidades, em países desenvolvidos e em desenvolvimento, com o intuito de estudar os custos derivados da reciclagem. Bohm *et al.* (2010) estudaram alguns municípios nos Estados Unidos da América, percebendo que o custo total do processo de reciclagem é superior ao de depositar diretamente em aterros, ainda que não seja uma opção sustentável a nível ambiental. Dubin e Navarro (1988) defenderam que é possível atingir economias de escala, dependendo da densidade dos resíduos. Já Folz (1995) concluiu, através da sua investigação, que o custo unitário de reciclar dependia da densidade populacional e da quantidade lixo reciclado: eram atingidas economias de escalas à medida que mais toneladas eram recicladas. Ainda, Bohm *et al.* (2010) perceberam que, na amostra estudada, centralizando e integrando as atividades era possível alcançar economias de escala, compensando a reciclagem relativamente ao depósito em aterro. No entanto, ao contrário dos autores anteriores, as economias de escala só existiam até ao peso 13.200 toneladas por ano – a partir desta quantidade voltaria a compensar depositar diretamente em aterros.

A complexidade de um sistema de recolha de resíduos é visível pela necessidade de considerar diferentes preocupações, como as questões sociais, económicas e ambientais na tomada de decisão. Recentemente, o aumento do preço dos combustíveis, dos custos operacionais, das preocupações ambientais e da regulamentação associada têm levado as empresas elevarem os seus interesses e objetivos de otimização dos seus modelos. Sendo que as atividades de recolha e transporte representam a maior fatia nos custos gerais (80%), pequenos melhoramentos podem tornar-se significativos nesta área (Markov *et al.*, 2014). Neste sentido, o estudo da definição das rotas ótimas torna-se necessário.

### **2.3 Vehicle Routing Problem (VRP)**

Segundo Schrage (1981), os problemas de *routing* e *scheduling* podem ser divididos essencialmente em duas classes: *arc routing*, *node routing*. As rotas baseadas em nós (*node routing*) são delineadas entre dois pontos, como indica o próprio nome, sendo

compensatória quando a distância entre dois nós é significativa. Nestes casos, é sabida a procura específica de cada ponto, ao contrário do que ocorre com o *arc routing*, onde a procura é dada nos arcos.

O conceito de *vehicle routing problem* (problema de definição de rotas de veículos, na literatura portuguesa) foi introduzido por Dantzig e Ramser (1959) como *The Truck Dispatching Problem*. O VRP pode ser definido como o problema de desenho de rotas de menor custo, com origem num depósito e destino a um conjunto de clientes geograficamente dispersos, podendo estas ser sujeitas a restrições adjacentes, utilizando um determinado número de veículos (Christofides, 1976). Christofides (1976) defende ainda que este problema é aplicado frequentemente em situações práticas que não estão diretamente associadas à distribuição, onde esta operação pode surgir na recolha, por exemplo.

Segundo Tin (1995), o âmbito do estudo desta problemática pode tomar proporções macro ou micro. A nível macro, o estudo foca-se na decisão estratégica das empresas, incluindo formas de distribuição/recolha e localização das instalações. A nível micro a questão central são as decisões táticas e operacionais, no domínio das áreas de influência das instalações, alocação de veículos e do estabelecimento de rotas de veículos.

Na medida em que a maior parte das decisões estratégicas estão previamente concebidas, a maioria dos estudos existentes têm foco no domínio micro. A alocação de veículos é uma questão fundamental, sendo que a capacidade dos mesmos e os tempos de viagem são decisivos na determinação das rotas e na eficiência do sistema.

O estabelecimento de rotas de recolha de resíduos torna-se assim o aspecto operacional que necessita frequentemente de alterações e, na maioria das vezes, resolve os problemas de eficiência e reduz os custos.

Nesta perspectiva, de acordo com Beliën *et al.* (2012), diversos estudos têm vindo a ser desenvolvidos, cujos objetivos recaem normalmente sobre a formulação de um modelo que resolve um problema ou dá uma solução próxima à ótima. Os objetivos que prevalecem são a redução do número de veículos, os custos, o número de colaboradores, a distância percorrida ou o tempo de serviço (Jozefowicz *et al.*, 2008). Frequentemente, a redução de custos é sempre um objetivo mais macro, sendo que sempre que não é o objetivo central, é um efeito lateral.

Para a resolução de problemas de rotas surgem diferentes métodos de solução que vão ao encontro dos objetivos propostos de cada problema.

### 2.3.1 Métodos de solução

O estudo de métodos de solução é uma área bastante explorada pela comunidade científica, pelo que não há um método perfeito que resolva todos os problemas de *VRP*'s. Simchi-Levi *et al.* (2008) propõem duas perspetivas distintas de solução. Por um lado, apresenta os modelos de simulação, que não consideram formulações que relacionem matematicamente a função objetivo com as variáveis em questão. Por outro lado, refere os modelos de resolução matemática, que incluem algoritmos exatos e não exatos.

Ao passo que os algoritmos exatos fornecem respostas ótimas aos problemas, ainda que não permitam a análise de extensa quantidade de dados, os algoritmos não exatos, também designados como heurísticas, permitem obter resultados aproximados ao ótimo. Na medida em que o VRP é um problema NP-difícil (Lenstra e Rinnoy Kan, 1981), a aplicação de algoritmos exatos apenas é eficiente para instâncias de reduzida dimensão. Na maior parte das vezes, justifica-se a utilização de heurísticas e meta-heurísticas, dada a aplicação prática dos problemas que admite grande volume de dados.

Os algoritmos exatos começaram a ser desenvolvidos logo após a introdução do tema VRP por meio de Christofides e Eilon (1969), mas o elevado tempo de execução deste método em casos de elevado volume de dados, aliado ao crescimento da indústria de transportes ao longo dos anos, o recurso a meta-heurísticas e heurísticas têm sido uma constante (Han e Ponce-Cueto, 2015).

Cordeau *et al.* (2002) classificam as heurísticas em dois tipos: heurísticas clássicas e meta-heurísticas. As heurísticas clássicas são desenvolvidas até à década de 90, podendo dividir-se em heurísticas de construção, heurísticas de *clusters* e heurísticas de melhoria (Laporte e Semet, 2002). As meta-heurísticas são encaradas a partir dos anos 90 e possibilitam a aproximação ao ótimo através da recombinação de soluções.

As heurísticas de construção são primeiramente estudadas por Clarke e Wright (1964), ao considerar que as rotas são desenvolvidas com base em critérios de poupança. Desde então muitas melhorias e incrementos foram estudados sobre esta heurística (Beltrami e Bodin, 1974; Liu e Shen, 1999). As heurísticas de *clusters* são compostas por duas fases; uma primeira de definição de agrupamento de clientes, onde cada grupo (*cluster*) deve ser servido por uma única rota de forma sequencial; e a segunda de definição das rotas

em si (Fisher e Jaikumar, 1981). Outra heurística de *clusters* foi desenvolvida por Gillet e Miller (1974) onde é considerado um círculo à volta do depósito e cada secção criada simboliza um cluster. As rotas são determinadas através de um eixo simbólico que segue o círculo e à medida que o eixo interceta um cliente este é adicionado à rota.

As heurísticas de melhorias são aplicadas após a definição de uma solução inicial, com o intuito de melhorar o resultado encontrado para a primeira solução. As melhorias podem ser consideradas como intra-rota (alteração da ordem dos clientes dentro de uma mesma rota) ou inter-rota, que passa por remover um ou vários clientes e alocá-los numa outra rota (Laporte, 2009).

As meta-heurísticas, comparando às heurísticas clássicas, são métodos bastante mais completos no que se refere à procura pelo intervalo de solução (Cordeau *et al.*, 2002). Estas recombina várias interações e soluções criando uma nova mais robusta, ainda que a solução inicial possa ser de qualidade reduzida (Laporte, 2009).

Estas têm sido amplamente estudadas nos últimos anos surgindo diversos métodos. Os métodos que emergem como os mais comuns são: *Genetic Algorithms*, *Tabu Search*, *Simulated Annealing* e *Ant Colony*.

O estudo destes métodos teve início com Holland (1975) ao estudar soluções através de *Population Search*. O seu método ficou popularizado por algoritmos genéticos, onde soluções-pai são extraídas da população atual e re combinadas. Caso se verifiquem melhorias, são introduzidos posteriormente os elementos de menor impacto.

Mais tarde, surgem os métodos de *Local Search*, cujos exemplos mais clássicos são o *Tabu Search* e *Simulated Annealing* (Laporte, 2009). O *Tabu Search* é introduzido por Glover (1986), consistindo na procura da melhor solução dentro do intervalo de solução encontrado através da exploração das zonas de proximidade. Neste método são definidos atributos que são desconsiderados num determinado número de iterações evitando soluções cíclicas. Este modelo sofreu ainda algumas melhorias com Cordeau *et al.* (1997) e Derigs e Kaiser (2007). Este método é encarado por Cordeau *et al.* (2002) como o mais adequado aos problemas de rotas, tendo sido estudado nesta área por Cordeau *et al.* (1997) e Bianchessi e Righini (2007).

O método de *Simulated Annealing* tem como base o mesmo princípio de exploração das áreas vizinhas, ainda que neste seja definido um critério que permite avaliar o nível de aceitação das soluções encontradas a partir da solução inicial (Kirkpatrick *et al.*, 1983).

Este método foi utilizado por Muttiah *et al.* (1996) para a localização de infraestruturas e por Sahoo *et al.* (2005) para a definição de rotas de recolha.

Por fim, o método de *Ant Colony* tem como princípio o comportamento de uma colónia de formigas na busca por comida. Este modelo é abordado em diversos problemas de rotas, como na indústria da recolha de resíduos, por Karadimas *et al.* (2007) para diminuir o tempo de recolha e por Bautista e Pereira (2004) para minimizar a distância percorrida.

### 2.3.2 Variantes do VRP

Dantzig e Ramser (1959) são os primeiros a introduzir o *Truck Dispatching Problem* ao modelar a forma como um conjunto de veículos com características homogéneas serve a procura de gasolina a um conjunto de gasolinhas, a partir de um único depósito, percorrendo o mínimo de distância possível. Cinco anos mais tarde, Clarke e Wright (1964) generalizaram esta questão para um problema de otimização linear, frequentemente encontrado no domínio da logística e transportes: como servir um conjunto de clientes geograficamente dispersos em torno de um depósito central, através um conjunto de veículos de variadas capacidades.

Os modelos atuais de VRP são, no entanto, diferentes daqueles estudos primordialmente por Dantzig e Ramser (1959) e Clarke e Wright (1964). Atualmente, os modelos incorporam, tanto quanto possível, os contextos reais dos problemas, despoletando a criação de diversas variantes do VRP simples.

Se logo desde o início do estudo do VRP a capacidade dos veículos foi sempre considerada como uma condição, a periodicidade surge de seguida com Beltrami e Bodin (1974), ao estudarem a minimização do número de veículos e do tempo percorrido na recolha de resíduos com diferentes periodicidades. Também Russel e Igo (1979) e Christofides e Beasley (1984) influenciaram os estudos seguintes realizados ao definirem duas heurísticas de resolução e um modelo matemático, respetivamente, para problemas com questões de periodicidade. Este problema foi amplamente estudado nas mais diversas áreas, nomeadamente: Baptista *et al.* (2002) e Teixeira *et al.* (2004) na recolha de resíduos em Portugal; Hemmelwayr *et al.* (2013) na recolha de resíduos e descarga numa entre várias infraestruturas intermédias; Angelelli e Speranza (2002) a adotarem os métodos de resolução para avaliar custos operacionais de diferentes tecnologias para a recolha de resíduos; Golden e Wasil (1987) na distribuição de refrigerantes; Banerjee-Brodeur *et al.* (1998) na distribuição de produtos hospitalares; e Blakeley *et al.* (2003) na

otimização de rotas de empresas de manutenção de elevadores.

Este problema escalou para outras realidades ao considerarem outro tipo de constrangimentos e condições, sendo os mais comuns: VRP com janelas temporais (*VRP with Time Windows – VRP-TW*, na literatura inglesa), VRP com Múltiplos Depósitos (*Multi-depot VRP – MDVRP*) e VRP com rotas abertas (*Open routes VRP – OVRP*).

O problema VRPTW foi primeiramente estudado por Solomon (1987) com o objetivo de servir um número de clientes em janelas temporais pré-definidas a um mínimo custo, em termos de distância percorrida, sem violar os limites de capacidade do veículos e tempo máximo de rota. Os métodos de resolução mais utilizados são o Tabu Search (Cordeau *et al.*, 2002), algoritmo genético e algoritmo Ant Colony (Kumar & Panneerselvam, 2012).

No modelo clássico do VRP, bem como numa parte dos estudos realizados nos problemas já descritos, as rotas estudadas são consideradas fechadas, isto é, começam e terminam no mesmo ponto. Schrage (1981) foi um dos primeiros a considerar a possibilidade de os veículos poderem terminarem num local distinto daquele que tiveram início. Bodin *et al.* (1981) desenvolveram esta possibilidade, ao estudar rotas de distribuição da FedEx por avião, onde estes partiam de Memphis e terminavam as rotas no último cliente e começando a rota seguinte a partir deste último ponto. Levy (2005) estudou também a distribuição de jornais porta a porta, através da subcontratação do serviço que apenas incluía o pagamento até à entrega do último jornal. O percurso realizado após satisfazer o último cliente, não era tida em conta. Brandão (2004) define OVRP como um problema de definição das melhores rotas para uma frota de veículos, onde cada uma é dada pela sequência de clientes que têm início num depósito e terminam num ponto distinto, como num cliente, por exemplo. Este tipo de problema é pouco desenvolvido pela comunidade científica, ainda assim, desde os anos 2000 alguns autores têm vindo a ter sucesso na resolução desta problemática utilizando o Tabu Search (Li *et al.*, 2007).

Laport *et al.* (1984) e Laporte *et al.* (1988) estudaram pequenos cenários, onde a rede era composta por vários depósitos, criando algoritmos exatos para a resolução deste tipo de problema. Esta rede pode ser resolvida através de um problema de rotas com múltiplos depósitos (MDVRP), na medida em que os clientes estão organizados em *clusters* em volta de cada depósito (Montoya-Torres *et al.*, 2016) - Figura 2.



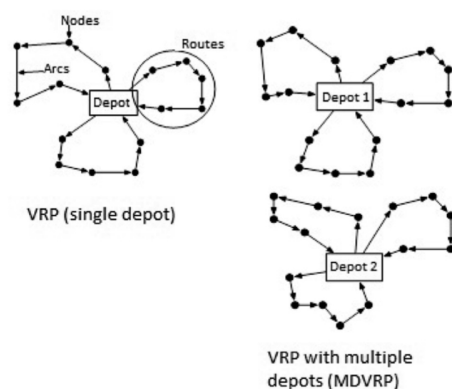


Figura 2 - Diferença entre *single depot* e *multi-depot*.

O estudo deste tipo de problema teve início com Kulkarni e Bhave (1985) e Laporte *et al.* (1988), como referido, ao estudarem a sua resolução com algoritmos exatos e, desde então, muitas têm sido as aplicações nas mais diversas áreas e com diferentes métodos de resolução.

Hadjiconstantinou e Baldacci (1998) consideraram problemas reais de uma empresa de serviços de manutenção, que consistiu na determinação de áreas de intervenção para cada depósito, da lista de clientes a visitar em cada dia e as rotas respetivas. O objetivo passou pela oferta do melhor serviço possível a um mínimo custo operacional. Este problema englobou todos os níveis de análise, desde as decisões mais estratégicas às opções mais operacionais, utilizando uma heurística como método de resolução.

As meta-heurísticas também têm sido aplicadas por diversos investigadores, para resolver problemas de múltiplos depósitos. Pela primeira vez, este método foi utilizado por Renaud *et al.* (1996) que estudam um modelo com restrições de capacidade e durações máximas de rotas, com o objetivo de otimizar os custos operacionais.

Cordeau *et al.* (1997) e Tüzün e Burke (1999) propuseram o algoritmo Tabu Search para resolver um problema da mesma natureza, ao passo que Cordeau *et al.* (2001) utilizaram o Tabu Search para minimizar a quantidade de veículos da frota. Neste problema os depósitos operam de forma independente nas áreas de intervenção respetivas, satisfazendo os pedidos dos seus clientes.

Partindo destes estudos, foi surgindo a necessidade de analisar a junção de várias restrições num mesmo estudo, como a inclusão de janelas temporais num modelo com múltiplos depósitos (MDVRPTW), avaliada por Cordeau *et al.* (2001).

Crevier *et al.* (2007) consideraram a possibilidade de incluir na rede depósitos

intermédios, onde a capacidade dos veículos pode ser renovada. Este modelo permite rotas de veículos que começam e terminam no mesmo depósito ou que tem ligação com outro depósito para renovar a capacidade e continuar a rota.

Há ainda autores que consideram o estudo de problemas com múltiplos objetivos como Montoya-Torres (2014) que inclui as questões da sustentabilidade social e ambiental nas decisões logísticas e Montoya-Torres *et al.* (2016) que procura a aplicação de um modelo MDVRP com o intuito de minimizar os custos de transporte e as emissões de carbono.

Ho *et al.* (2008) sintetizaram os pressupostos necessários à resolução de um problema com natureza nos múltiplos depósitos. Este assume que: o número e respetiva localização das bases de veículos têm de estar estipuladas previamente; a capacidade de cada veículo considerado é limitada; as rotas têm início e término no mesmo depósito; e a localização e procura de cada cliente é conhecida previamente. Este revela ainda que os clientes deverão ser organizados em *clusters* que serão servidos pela mesma base de veículos, bem como devem ser satisfeitos de forma sequencial sem exceder a capacidade dos veículos. A resolução deste problema passa por otimizar os tempos ou as distâncias percorridas

Recentemente, surgiu uma nova variante que estuda um problema de rotas que engloba o MDVRP clássico de rotas fechadas com OVRP, denominado de MDVRP-COM - *MDVRP with mixed closed and open routes* (Ramos *et al.*, 2013).

Esta variante foi primeiramente estudada por Liu e Jiang (2012) que avaliaram um sistema com parte da distribuição dos produtos contratada a outra entidade. Estes veículos subcontratados não teriam de voltar necessariamente ao depósito inicial, podendo executar rotas abertas, conjugando com as rotas fechadas realizadas pelos veículos pela outra entidade responsável pela distribuição.

Ramos *et al.* (2013) estudou esta mesma possibilidade num sistema de logística inversa, na área da recolha de óleos alimentares usados, ao desenvolver um modelo do tipo *mixed integer linear programming* (MILP). Como referido, este modelo concilia os problemas MDVRP e OVRP, sendo a rede caracterizada por múltiplos depósitos onde os veículos da frota podem executar quer rotas abertas, quer rotas fechadas (ver Figura 3). A formulação desenvolvida tem por base algoritmos desenvolvidos para os problemas de OVRP (Bektaş e Elmastaş, 2007; Letchford *et al.*, 2006).

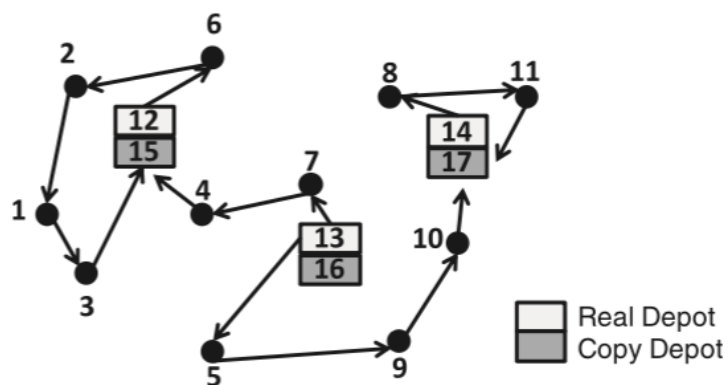


Figura 3 – Ilustração do problema MDVRP-MCO (Ramos *et al.*, 2013).

Este estudo permitiu otimizar o sistema em estudo, obtendo poupanças em 11% nos custos totais de contratação da empresa de recolha. O impacto do aumento da rede de recolha foi também considerado, levando à redução do custo de recolha por cliente.

Ainda que seja visível a larga amplitude dos estudos, ao considerarem as mais variadas restrições e indústrias de aplicação dos problemas, há modelos que ainda carecem de avaliação e melhoria futura.

### 3. Metodologia

De acordo com Hillier e Lieberman (2006), a resolução de um problema real de otimização implica uma sequência de cinco etapas distintas (Figura 4).

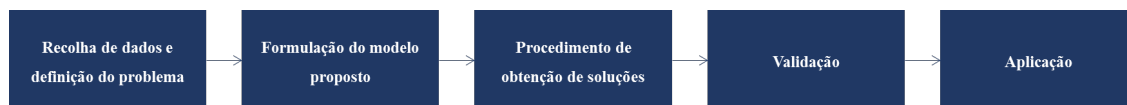


Figura 4 - Metodologia para resolução de um problema de otimização.

#### Recolha de dados e definição do problema

O problema da presente dissertação consiste no estudo da capacidade de otimização de um modelo de rotas mistas (abertas e fechadas) numa rede com 7 depósitos, face à comparação com o cenário atualmente utilizado pela Valorsul de apenas um depósito com rotas fechadas.

O problema de configuração da rede e rotas em estudo é conhecido na literatura como MDVRP-MCO. Para a resolução do mesmo será utilizado o modelo proposto por Ramos *et al.* (2013), adaptando-o ao contexto deste caso. Para o estudo da possibilidade de implementar múltiplos depósitos e a realização de rotas abertas e fechadas numa rede de grande amplitude consideram-se como infraestruturas da rede: 7 bases de veículos, a CTRO – Central de Tratamento de Resíduos do Oeste e os pontos de recolha existentes. Para a avaliação deste novo modelo são criados dois novos cenários que têm como base de comparação o cenário atualmente praticado.

O estudo tem foco no resíduo do papel/cartão, na medida em que é o resíduo com maior volume de dados, o que permite tratá-los e analisá-los com maior rigor, detalhe e aproximação à realidade do problema. Os dados que serviram de base para o estudo foram fornecidos pela Valorsul, contendo informação acerca de todos os circuitos efetuados entre o período de janeiro a setembro de 2013. Estes incluíam informação geográfica de todos os pontos de recolha, bem como a qual dos circuitos pré-definidos estes pertenciam. A informação relativa às rotas continha dados sobre os contentores recolhidos, o seu nível de enchimento, o total de quilómetros e tempo efetuados e ainda a quantidade de papel/cartão recolhida. Apesar de os dados conterem informação até setembro de 2013, a informação só estava completa e uniforme para todas as rotas até junho de 2013, pelo que a amplitude temporal dos dados tratados é respetiva aos primeiros 6 meses do ano de

2013. Estes dados permitiram retratar o cenário atualmente praticado, bem como definir alguns *inputs* ao modelo em estudo.

### **Formulação do modelo proposto**

A complexidade na obtenção dos resultados referentes ao problema de múltiplos depósitos gerou a necessidade de separar a sua resolução em três fases distintas. Todas tiveram recurso ao *software* GAMS - *General Algebraic Modeling System* –, um sistema de modelação de problemas de otimização, que permite o desenho e resolução de problemas de diferentes origens, como de programação linear e não linear. O algoritmo exato foi adaptado ao contexto deste problema e modelado no *software*. Esta formulação é explicada detalhadamente no capítulo 4.

### **Procedimento de obtenção de soluções e validação**

Desta forma, para a validação e execução do modelo utilizado é necessário definir alguns pressupostos e tratar os dados fornecidos pela empresa, por forma a obter os vários *inputs* necessários à execução do algoritmo, que serão detalhados mais adiante no capítulo 5 e 6. A fase de tratamento dos dados respetivos ao contexto atual da Valorsul teve como recurso o *Microsoft Office Excel*, onde foi possível numa fase preliminar excluir os dados ilegíveis ao estudo, e de seguida trabalhá-los, por forma a obter os *inputs* necessários ao algoritmo. Através da mesma ferramenta, foram ainda analisados os dados fornecidos, de modo a retratar a realidade atual, servindo esta análise como termo de comparação aos resultados obtidos posteriormente no modelo estudado.

Na aplicação do novo modelo, para a definição da quantidade de recolha em cada ponto considerou-se um período temporal de 4 semanas (28 dias), que são consideradas como sendo um mês. O algoritmo utilizado para a resolução do problema apenas admite até 200 *inputs* relativos aos pontos de recolha e procura respetiva, sob pena de não originar resultados fiáveis. Nesta medida, os pontos de recolha foram organizados por *clusters*, tendo como critério a localização geográfica. O algoritmo em estudo admite que as rotas efetuadas são todas realizadas na mesma frequência de recolha. A par disso, os pontos de recolha revelaram níveis de procura bastante diferentes, surgindo a necessidade de lhes atribuir uma frequência de recolha diferente (7, 14, 21 ou 28 dias).

Assim, foi necessário calcular: a densidade do resíduo papel/cartão, as quantidades médias a recolher por ponto de recolha, a frequência de recolha dos mesmos, a definição

de *clusters* de pontos de recolha, a distância entre pontos de recolha, distância entre *clusters* e ainda a distância entres estes pontos e os depósitos existentes.

### **Aplicação**

Por fim, o modelo é aplicado ao longo das três fases, sendo analisados os resultados quantitativa e qualitativamente, nos capítulos 7 e 8 respetivamente. A análise quantitativa baseia-se na comparação dos resultados entre os cenários criados do modelo em estudo e do cenário atual praticado, tendo em conta os seguintes *outputs*: número de rotas a serem efetuadas; total de quilómetros percorridos; tempos correspondentes às rotas definidas; áreas de intervenção de cada um dos depósitos. Por sua vez, a análise qualitativa consiste na observação das implicações económicas e sociais da implementação de um modelo *multi-depot* à luz da teoria estudada.

#### 4. Modelo proposto

Neste capítulo é descrito o modelo utilizado para a reconfiguração da rede logística: é demonstrado a formulação matemática desenvolvida por Ramos *et al.* (2013), utilizada nas duas primeiras fases do processo, e a heurística de melhoria utilizada quando necessária na terceira das fases do processo de determinação das rotas a percorrer.

Inicialmente, é esquematizado e apresentado de forma genérica o modelo proposto (Figura 5), sendo cada uma das três fases que o compõem descritas de seguida.

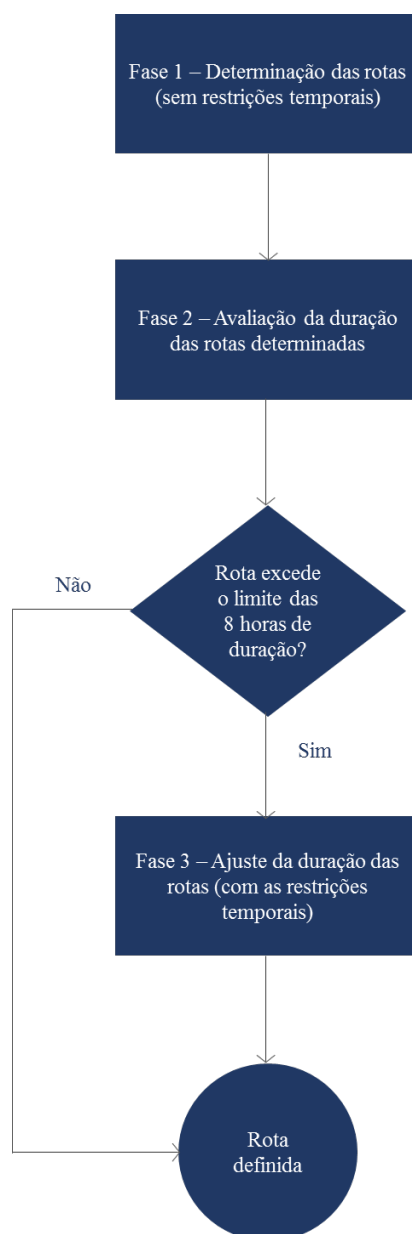


Figura 5 - Fluxograma do processo de determinação de rotas.

#### 4.1 Fase 1 – Determinação das rotas (sem restrições temporais)

A primeira das fases de resolução do problema MDVRP-MCO é relativa à obtenção das rotas ótimas e dos quilómetros correspondentes. Esta fase não inclui restrições temporais, na medida em que a adição da restrição temporal ao volume de dados utilizados iria sobrecarregar o *software* utilizado e, por sua vez, impedir a obtenção de resultados com margem de erro reduzida. Para a execução deste algoritmo, cuja função objetivo é a minimização do número de quilómetros percorridos pelas rotas abertas e fechadas, são necessários os seguintes *inputs*:

- Número de pontos de recolha a satisfazer em cada frequência;
- Procura de papel/cartão nos pontos de recolha, isto é, a quantidade de resíduos a coletar em cada contentor;
- Número de bases de veículos a considerar;
- Distância efetiva entre cada ponto de recolha;
- Distâncias entre cada ponto de recolha e os vários depósitos;
- Distâncias entre os depósitos e a CTRO (caso os veículos terminem a rota num depósito diferente do existente na CTRO, estes têm ainda de transportar os resíduos recolhidos para a central de tratamento).
- Capacidade dos veículos.

Assim, de seguida é apresentada a formulação matemática desenvolvida por Ramos *et al.* (2013), bem como os índices, conjuntos, parâmetros e variáveis correspondentes, para a resolução do problema apresentado.

##### Índices

$i, j$  e  $g$  - Depósitos e locais de recolha.

$h$  - Estação de triagem/CTRO

##### Conjuntos

Estes definem a estrutura da rede de recolha, sendo a partir destes que são construídas a função objetivo e as equações que definem as restrições do modelo. Como supracitado, a rede de recolha é formada por locais de recolha e depósitos (conjunto  $V$ ) e pelas estações de triagem (conjunto  $H$ ). O conjunto  $V$  compõe-se ainda pelo:

$V_C$  - Conjunto dos locais de recolha,  $V_C = \{1, \dots, n\}$ ;



$V_d$  – Conjunto dos depósitos reais,  $V_d = \{n + 1, \dots, n + w\}$ ;

$V_f$  – Conjunto dos depósitos cópia,  $V_f = \{n + w + 1, \dots, n + 2w\}$ .

Existe o conjunto dos depósitos reais e cópia, na medida em que é necessário distinguir os depósitos de partida e de chegada que, neste caso podem corresponder ao mesmo depósito ou a depósitos distintos. As rotas obtidas têm início no conjunto  $V_d$  e terminam no conjunto  $V_f$ .

### Parâmetros:

$d_{ij}$  – Distância entre  $i$  e  $j$  (em km)

$dd_{ih}$  - Distância entre  $i$  e  $h$  (em km)

$fr$  – Número de vezes que a recolha é efetuada dentro do período temporal

$Q$  – Capacidade da viatura de recolha (em kg)

$QT$  – Capacidade da viatura de transporte para o centro de triagem (em kg)

$P_i$  – Quantidade a recolher no local de recolha  $i$  (em kg)

$Topp$  – Soma da quantidade a recolher em todos os locais de recolha (em kg)

$NV$  – Número de veículos necessários para efetuar a recolha dos resíduos

### Variáveis

Contínuas:

$y_{ij}$  - Quantidade de resíduos transportados entre  $i$  e  $j$ ,  $i \in V$ ,  $j \in V$ ;

$fl_{ih}$  - Quantidade de resíduos transportados entre  $i$  e o centro de triagem  $h$ ,  $i \in V$ ,  $j \in V$ ;

Binárias:

$x_{ij} = 1$ , caso  $j$  seja visitado imediatamente a seguir a  $i$ . Se não,  $x_{ij} = 0$ ,  $i \in V$ ,  $j \in V$ ;

### Modelo matemático:

Tendo em conta o problema em estudo e os parâmetros e as variáveis consideradas, de seguida é demonstrada a formulação matemática proposta por Ramos *et al.* (2013).

### Função objetivo

$$(1) \text{ Min } Z = \frac{1}{2} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} x_{ij} d_{ij} fr + 2 \sum_{i \in V_f} \sum_{h \in H} \frac{fl_{ih} dd_{ih}}{QT}$$

**Funções de restrição**

$$(2) \sum_{i \in V_c} (y_{ij} - y_{ji}) = 2p_i, i \in V_c$$

$$(3) \sum_{i \in V_c} \sum_{j \in V_f} y_{ij} = Topp$$

$$(4) \sum_{i \in V_c} \sum_{j \in V_f} y_{ij} \leq NVQ - Topp$$

$$(5) \sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} y_{ij} \leq NVQ$$

$$(6) \sum_{i \in V_d} \sum_{j \in V_c} y_{ij} = 0$$

$$(7) \sum_{i \in V} x_{ij} = 2, j \in V_c \wedge i \neq j$$

$$(8) y_{ij} + y_{ji} = Qx_{ij}, (i, j) \in V \wedge i \neq j$$

$$(9) \sum_{j \in V_c} y_{ij} + \sum_{j \in V_c} y_{ji} = \sum_{j \in V_c} y_{(i+w)j} + \sum_{i \in V_f} y_{j(i+w)}, i \in V_d$$

$$(10) \sum_{i \in V} x_{ij} = 0, j \in V_c \wedge i \neq j \wedge p_j = 0$$

$$(11) \sum_{i \in V} y_{ij} = 0, j \in V_c \wedge i \neq j \wedge p_j = 0$$

$$(12) y_{ij}(Q - p_j) - y_{ij}p_j \geq 0, (i, j) \in V$$

$$(13) y_{ji}(Q - p_j) - y_{ij}p_j \geq 0, (i, j) \in V$$

$$(14) \sum_{j \in V_c} y_{ji} = \sum_{j \in V_c} f_{l_{jh}}, j \in V_f$$

A função objetivo (1) modela a minimização da distância total efetuada numa rede de um sistema de recolha seletiva. Esta formulação da função objetivo está repartida em duas partes distintas. Uma primeira que tem em conta a distância percorrida desde o início da rota até ao término, contando a distância entre os vários pontos de recolha e entre estes e os depósitos. O modelo devolve duas rotas idênticas, mas com orientações opostas. Desta forma é necessário dividir a distância percorrida por 2, pois os veículos em cada rota circulam apenas numa direção. A segunda parte da função respeita à distância efetuada pelos veículos de recolha que transportam os resíduos desde os depósitos finais até à CTRO.

Relativamente às equações que restringem a função objetivo, são seguidamente apresentados os significados respetivos a cada uma.

A restrição (2) garante que o fluxo de saída menos o fluxo de entrada em cada local de recolha é igual ao dobro da quantidade a recolher em cada ponto.

A restrição (3) assegura que o total do fluxo de entrada dos depósitos de término (depósitos cópia) é idêntico à quantidade recolhida ao longo de todo o percurso.

A restrição (4) garante que o total de fluxo de saída dos depósitos de término (depósitos cópia) é igual à capacidade residual da frota de veículos.

A restrição (5) constata que o total do fluxo de entrada dos depósitos reais é igual à soma da capacidade dos veículos da frota.

A restrição (6) garante que o fluxo de saída dos depósitos de começo é igual a 0, uma vez que os veículos partem com a capacidade vazia.

A restrição (7) garante que cada ponto de recolha tenha dois pontos de ligação.

A restrição (8) assegura que a soma do fluxo de entrada e de saída de um ponto de recolha é igual à capacidade dos veículos de recolha da frota.

A restrição (9) assegura que o número de veículos que inicia uma rota é igual ao número de veículos que terminam as mesmas rotas.

As restrições (10) e (11) garantem que pontos de recolha com quantidade 0 para recolher não são incluídos em nenhuma rota.

A restrição (12) e (13) permitem facilitar a procura da solução ótima.

A restrição (14) garante que o fluxo total de entrada nos depósitos de término é igual ao fluxo de entrada na CTRO.

#### 4.2 Fase 2 – Avaliação da duração das rotas determinadas

Esta segunda etapa consiste na obtenção dos tempos correspondentes às rotas definidas na primeira fase. Esta passa por executar o algoritmo para aferir a duração das rotas obtidas na fase anterior. Neste sentido, além dos *outputs* do algoritmo anterior (rotas), são necessários os seguintes valores:

- Velocidade média dos veículos dentro das localidades (clusters);
- Velocidade média dos veículos fora das localidades;
- Tempo de recolha de cada contentor;
- Tempo de descarga do veículo no depósito no final da rota;
- Distância média entre os contentores recolhidos;
- Distância entre cada ponto de recolha e os vários depósitos;
- Distância entre os depósitos e a CTRO.

Seguidamente é apresentada a formulação matemática também desenvolvida por Ramos *et al.* (2013), bem como os parâmetros e variáveis correspondentes, para a obtenção dos tempos respetivos de cada rota definida.

##### Parâmetros

$ac$  – Distância média entre contentores (em km)

$av$  – Velocidade média no interior dos locais de recolha (em km/min)

$tl_i$  – Distância a percorrer no interior do local de recolha  $i$  (em km),  $tl_i = ac \times c_i$

$t_i$  – Tempo necessário para recolher o local de recolha  $i$  (em min),  $t_i = ac \times c_i + \frac{tl_i}{av}$

$f$  – Velocidade média entre locais de recolha (em km/min)

$r_{ij}$  – Tempo necessário para viajar entre  $i$  e  $j$ ,  $r_{ij} = \frac{d_{ij}}{f}$

$eMax$  – Duração máxima da rota de recolha

$Ll$  – Tempo necessário para descarregar o material (em min)

**Variáveis:**

Contínuas:

$TS_{ij}$  – Tempo de saída de  $i$  para  $j$ ,  $i \in V, j \in V$ ;

$TC_{ij}$  – Tempo de chegada a  $j$  proveniente de  $i$ ,  $i \in V, j \in V$ ;

**Formulação matemática:**

$$(15) TS_{ij} + r_{ij}x_{ij} = TC_{ij}, (i, j) \in V \wedge i \neq j$$

$$(16) \sum_{i \in V} (TS_{ij} - TC_{ij}) = 2t_j, j \in V_c \wedge i \neq j$$

$$(17) TS_{ij} \sum_{i \in V} TC_{gi} \leq t_i x_{ij}, i \in V_c \wedge j \in V \wedge i \neq j$$

$$(18) TS_{ij} \leq BigM \times x_{ij}, (i, j) \in V$$

$$(19) TC_{ij} \leq BigM \times x_{ij}, (i, j) \in V$$

$$(20) TC_{ij} + Ll \leq eMax, i \in V_f \wedge j \in V$$

A restrição (15) garante que o tempo de saída do ponto  $i$  somado ao tempo de viagem do ponto  $i$  ao ponto  $j$  é igual ao tempo de chegada no ponto  $j$ .

A restrição (16) assegura que o tempo de saída menos o tempo de chegada a cada ponto de recolha é igual ao dobro do tempo despendido em cada ponto de recolha.

A restrição (17) garante a continuidade temporal.

A restrição (18) e (19) asseguram que se o percurso  $(i, j)$  não é considerado, os tempos de saída e entrada de  $i$  a  $j$  é igual a 0.

A restrição (20) assegura que a duração de uma rota mais o tempo de recolha e de descarga não ultrapassa a duração máxima definida.

Sabendo que na etapa anterior (Fase 1) não são incorporadas as limitações temporais, o algoritmo em estudo pode devolver valores de qualquer ordem de grandeza em termos de tempo necessário para efetuar a rota. Neste sentido, para os casos em que as rotas excederam as 8 horas definidas como limite temporal, sentiu-se a necessidade criar uma terceira fase que colmatasse esta lacuna. Caso as durações obtidas cumprissem o limite estabelecido, não eram sujeitas à última das fases, ficando definidas.

### **4.3 Fase 3 – Ajuste da duração das rotas (com restrições temporais)**

Dada a complexidade do problema, para os casos em que o tempo de percurso superou o tempo máximo permitido, foi aplicada uma heurística de melhoria para correção dos tempos, que permite ajustar os clientes nas diferentes rotas, de modo a obter uma solução final dentro dos limites temporais definidos (Laporte, 2009).

Os critérios de aplicação da heurística nesta última fase tiveram por base a distância entre os pontos de recolha e a quantidade a recolher nos respetivos *clusters* (freguesias). Assim, a heurística consiste em retirar às rotas, no início ou fim do percurso, os *clusters* que provocam o excesso de tempo efetuado, alocando-os a uma rota já criada ou criando uma nova rota. Ou seja, às freguesias retiradas a uma rota com duração superior às 8 horas, é observada a sua procura no total dos *clusters* que abrange e analisada a possibilidade de alocá-la a uma rota já existente com menor quantidade total de resíduos recolhidos e com duração percorrida com margem de inclusão de um nova freguesia. Caso esta opção não seja praticável, é criada uma nova rota, cujas freguesias nas mesmas circunstâncias são adicionadas, pela regra da menor distância, sendo adicionada uma nova rota ao conjunto já definido.

## 5. Caso de estudo

### 5.1 Valorsul

A Valorsul – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos das Regiões de Lisboa e do Oeste, S.A. é a empresa responsável pelo tratamento e valorização de resíduos sólidos urbanos na zona oeste. Esta cobre 19 municípios, sendo que é também a empresa a nível nacional que lida com o maior volume a nível populacional e de resíduos (cerca de 20% - 950 mil toneladas - dos resíduos totais produzidos pelos 1.6 milhões de habitantes da região). Ainda que esteja responsável pelo tratamento e valorização de todos os resíduos produzidos na zona Oeste, a recolha pode ser efetuada pelos próprios municípios como é o caso dos concelhos de Amadora, Lisboa, Loures, Odivelas e Vila Franca de Xira, cuja recolha é independente da Valorsul. A área de intervenção da Valorsul a nível de tratamento é assim composta pelos 19 municípios que representam 3378 km<sup>2</sup> de área geográfica (Figura 6).



Figura 6 - Área de intervenção da Valorsul (Valorsul, 2016).

No que se refere à forma como a Valorsul opera na fase de recolha nos seus 14 municípios, esta divide-se por tipologia de resíduo: a recolha orgânica é respeitante aos resíduos orgânicos, como a matéria alimentar; a recolha indiferenciada respeita aos resíduos que não são diferenciados de qualquer forma; e a recolha seletiva que é realizada de forma diferenciada pelo papel/cartão, plástico/metal ou vidro.

### 5.1.1 Descrição do processo de recolha

O processo de recolha é idêntico para os três tipos de resíduos que integram a rede de recolha seletiva. Este tem início na definição dos circuitos a realizar no dia seguinte, com o auxílio de um programa computacional, que por meio de um algoritmo avalia as previsões dos níveis de enchimento dos ecopontos. Os circuitos gerados são constantes pelo que os contentores a recolher mantêm-se fixos, como será aprofundado adiante. De seguida, ao circuito é alocado um veículo, um motorista e um ajudante. Estes intervenientes, por observação, vão registando o nível de enchimento (0%, 25%, 50%, 75% ou 100%) num *software*, à passagem pelos pontos de recolha. Esta fase é repetida de forma sistemática até ao último ecoponto ser recolhido, ou até que a capacidade do veículo não permita mais. No fim, o veículo volta à base de onde partiu, onde é pesado para saber a quantidade total de quilogramas de resíduos recolhidos. Simultaneamente, são inseridos os níveis de enchimento, quilómetros percorridos e tempo de percurso no programa que serve de base de decisão à definição de rotas, para dar origem a novo ciclo. No fim do processo, o veículo é reabastecido e parqueado, de forma a estar disponível a efetuar um próximo circuito.

### 5.1.2 Infraestruturas

Para ser possível operacionalidade deste processo, a Valorsul conta com um sistema logístico constituído por: 2 centros de triagem; 8 ecocentros – pontos de recolha comuns a várias comunidades, onde os cidadãos têm oportunidade de colocar lá os seus resíduos de maior dimensão; 1 central de valorização energética; 1 instalação de tratamento e valorização de escórias; 2 aterros sanitários e 6 estações de transferência – instalações onde os veículos depositam resíduos indiferenciados que posteriormente são recolhidos e transferidos para as centrais de tratamento. Algumas das localizações destas instalações podem ser coincidentes, por exemplo, em todas as estações de transferência está também alocado um ecocentro. Existe ainda um local denominado de Centro de Tratamento de Resíduos do Oeste (CTRO) que aglomera 1 dos Centros de Triagem, 1 Aterro Sanitário e 1 Ecocentro, que serve de base de veículos – este é o ponto de origem e de término das rotas realizadas.

### 5.1.3 Ecopontos

A nível de pontos de recolha, como previamente descrito, devido à crescente importância da recolha seletiva, o aumento dos pontos de recolha tem sido visível. Atualmente, a



Valorsul tem de servir 2544 ecopontos espalhados por 14 concelhos dentro de 3 distritos – Leiria, Lisboa e Santarém. Estes são locais constituídos por 3 contentores distintos, onde o consumidor final deposita os resíduos que produz de forma diferenciada – papel/cartão no contentor azul, plástico/metal no contentor amarelo e vidro no contentor verde. No Anexo 1 é possível consultar a distribuição dos contentores pelas freguesias.

Os contentores disponibilizados possuem diferentes capacidades, sendo que os mais comuns são os de superfície com uma capacidade de  $2,5\text{m}^3$ , constituindo 85% do total de ecopontos existentes.

O cálculo da quantidade de resíduos depositados em cada ecoponto é uma tarefa complicada por não existir até a data um medidor exato, que compense os custos associados ao mesmo. Os colaboradores responsáveis pela recolha registam “a olho” o nível de preenchimento do ecoponto e, através da densidade teórica conhecida é feito o cálculo do peso estimado em cada ecoponto.

### **5.1.4 Frota de veículos**

De forma a servir estes pontos, a Valorsul tem à disposição uma frota de 12 veículos que efetuam a recolha de resíduos – cada rota só recolhe um tipo de resíduo (vidro, papel/cartão ou plástico/metal) e outros 2 adicionais com a função de manutenção dos contentores. Esta frota heterogénea é constituída por veículos de diferentes capacidades, sendo que na sua maioria têm uma capacidade máxima de  $20\text{m}^3$ , como é possível observar na Tabela 2. Estes constrangimentos têm influência na forma como as rotas são planeadas, como será explorado mais adiante, podendo assim influenciar a eficiência do sistema e os custos derivados do mesmo.

Esta frota inclui ainda veículos com capacidade de compactação dos resíduos que são utilizados na recolha do papel/cartão e do plástico/metal por serem resíduos com reduzida densidade. Ao serem compactados está-se a otimizar espaço, na medida em que numa mesma capacidade volúmica possam caber mais quilogramas de resíduos. Tal não é possível com o vidro que já é um material bastante denso que não permite o mesmo nível de compactação, pelo que é recolhido por veículos sem compactador.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

| Matrícula | Marca  | Modelo          | Arranque | Função | Tipologia    | Peso Bruto (t) | Volume (m3) | Carga Util (kg) |
|-----------|--------|-----------------|----------|--------|--------------|----------------|-------------|-----------------|
| 78-91-SH  | MAN    | 18.284 LK L2000 | 14/11/01 | RS     | Caixa Aberta | 19             | 20          | 9 000           |
| 78-92-SH  | MAN    | 18.284 LK L2000 | 14/11/01 | RS     | Caixa Aberta | 19             | 20          | 9 000           |
| 90-26-SH  | MAN    | 18.284 LK L2000 | 14/11/01 | RS     | Caixa Aberta | 19             | 20          | 9 000           |
| 34-24-ZS  | Nissan | Atleon 140-80/3 | 01/05/05 | ME     | Caixa Aberta | 8              |             | 2 800           |
| 62-50-ZZ  | Volvo  | FM9             | 15/06/05 | RS     | Compactação  | 26             | 20          | 13 945          |
| 62-51-ZZ  | Volvo  | FM9             | 15/06/05 | RS     | Compactação  | 26             | 20          | 13 945          |
| 98-CQ-96  | MAN    | TGM 18.280      | 01/04/07 | RS     | Compactação  | 19             | 20          | 5 580           |
| 98-CQ-97  | MAN    | TGM 18.280      | 01/04/07 | RS     | Compactação  | 19             | 20          | 5 580           |
| 98-CQ-98  | MAN    | TGM 18.280      | 01/04/07 | RS     | Compactação  | 19             | 20          | 5 580           |
| 56-DI-75  | Toyota | Dyna XZU425LD   | 01/06/07 | ME     | Caixa Aberta | 8              |             | 2 520           |
| 34-EQ-14  | MAN    | TGM 18.280      | 24/01/08 | RS     | Compactação  | 19             | 20          | 5 580           |
| 34-EQ-13  | MAN    | TGM 18.280      | 30/01/08 | RS     | Compactação  | 19             | 20          | 5 580           |
| 45-GX-94  | Volvo  | FM9             | 30/01/09 | RS     | Compactação  | 19             | 15          | 4 465           |
| 46-HA-11  | Volvo  | FM9             | 30/01/09 | RS     | Compactação  | 19             | 15          | 4 465           |

Tabela 2 - Lista de veículos disponíveis da Valorsul.

### 5.1.5 Circuitos

#### 5.1.5.1 Constituição

A rede de circuitos realizados pela Valorsul para a recolha seletiva dos resíduos é constituída por 82 circuitos pré-estabelecidos. Cada circuito é direcionado à recolha de um único tipo de resíduo, estando repartido por 26 circuitos para o papel/cartão, outros 26 para o plástico/metálico e 30 percursos para a recolha do vidro. Apesar dos percursos realizados pelos veículos estarem estabelecidos, é recorrente serem feitas retificações pelo que são por vezes recolhidos ecopontos pertencentes a outros circuitos que estejam nas proximidades, caso haja capacidade no veículo. Desta forma, as rotas acabam por ser sempre distintas entre si, mesmo que sigam a linha orientadora do circuito a percorrer.

#### 5.1.5.2 Frequência

Relativamente à frequência da recolha, esta também não é fixa, sendo analisada diariamente a necessidade de recolha através de previsões de enchimentos dos ecopontos.

No caso do papel, o resíduo com maior foco nesta dissertação, o circuito que tem uma maior frequência é realizado com um intervalo de 14.3 dias e o circuito com menor frequência é recolhido com um intervalo de 5 dias, sendo que a média de frequência dos circuitos situa-se nos 9.7 dias.

### **5.1.5.3 Pontos de recolha e peso coletados**

A nível do número de ecopontos coletados em cada circuito, este não é constante como já descrito. Se por um lado há circuitos realizados onde foram recolhidos 52 contentores, por outro lado há outros que atingiram valores de 120 ecopontos recolhidos.

Além do planeamento ineficiente e grandes variações na procura, nos dados fornecidos pela Valorsul há registo de percursos que recolheram apenas 5 contentores, com peso total recolhido na ordem dos milhares. Esta incoerência de valores – não é possível cada contentor albergar quilos suficientes para perfazer a quantidade total recolhida mencionada - pode advir de problemas de registo que é feito manualmente pelos motoristas dos veículos, aquando da anotação dos níveis de preenchimento, pelo que é possível que por vezes certos ecopontos não sejam devidamente apontados.

A par do que acontece com os ecopontos, o peso recolhido em cada circuito do papel/cartão também apresenta valores bastante díspares, onde é atingido o mínimo de 1020kg e o máximo de 5560kg. A média situa-se nos 2824.9kg.

### **5.1.5.4 Distância e tempo de percurso**

Em termos de distâncias, os circuitos do papel/cartão variam entre 71km e 255km percorridos, sendo que a média fica pelos 138.4km.

No que se refere às durações, os turnos existentes estão definidos como de 8 horas, ainda assim estes turnos são por diversas vezes ultrapassados, variando entre cerca de 5 horas e 11 horas.

É deste modo claro que os turnos diferem bastante entre si quer em termos de carga horária, como de distância percorrida, sendo necessária a revisão das rotas, de modo a torná-las mais uniformes.

## **5.2 Cenários de melhoria**

O modelo de operação atual da Valorsul enfrenta alguns constrangimentos que impedem a sua otimização, como a extensa área de intervenção e a assimetria da mesma que, a par do reduzido número de bases de veículos, provocam a realização de longas distância para percorrer todos os pontos de recolha abrangidos. Ainda, as restrições horárias mencionadas, conjugadas com as longas distâncias, são por vezes de impossível cumprimento. Os níveis de enchimento, que por serem caracterizados por uma elevada

incerteza e por estarem sujeitos ao erro humano, provocam também a falta de uniformização das rotas, em termos de tempos, distâncias e peso recolhidos.

O conjunto de circuitos atualmente realizados foram reestruturados no início do ano de 2013, no entanto continua a não ser suficiente a otimização efetuada. Neste sentido, ao longo da dissertação são estudados dois cenários alternativos ao atual que admite a possibilidade de contar com as atuais 6 estações de transferência como base de veículos, além da CTRO. Estes cenários têm por base um modelo de definição de rotas com múltiplos depósitos com rotas abertas e fechadas, como mencionado, com o intuito de colmatar alguns constrangimentos existentes da situação atual.

Para o estudo na eficácia do modelo em estudo foram considerados três cenários distintos, que são comparados entre eles na análise dos resultados obtidos:

- **Cenário atual** – modelo caracterizado por uma base de veículos localizada nas instalações da CTRO, sendo que todos os veículos iniciam e terminam todos os seus percursos de recolha de resíduos (ver Figura 7). É, portanto, um modelo de rotas exclusivamente fechadas onde um único depósito satisfaz as necessidades de todos os pontos de recolha presentes na área de intervenção existente.
- **Cenário I** – modelo com múltiplos depósitos – 7 bases de veículos (ver Figura 8) – com possibilidade de realizar quer rotas abertas, quer fechadas. Este teve por base os níveis de procura e as restrições existentes na modelo atual da Valorsul, de modo a poder ser estudada, com maior aproximação à realidade, a sua viabilidade e possível otimização relativamente ao modelo praticado atualmente. Ainda, é considerado que o nível de serviço estimado é de 100%, na medida em todos os pontos de recolha são recolhidos na frequência considerada como mais adequada tendo em conta a freguesia onde estão inseridos.
- **Cenário II** – a par do cenário I, este tem suporte em 7 depósitos (ver Figura 8). O modelo de rotas é igualmente misto – possibilidade de haver rotas abertas e fechadas. No entanto, o nível de serviço oferecido é de 80% face ao cenário I, significando que no limite 20% dos pontos de recolha são coletados mais tarde do que a frequência indicada inicialmente.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS



Figura 7 – Localização do depósito no cenário atual.



Figura 8 – Localização dos depósitos nos cenários I e II.

## 6. Tratamento de dados

Esta secção descreve os procedimentos tomados para o tratamento dos dados disponibilizados pela Valorsul, bem como os pressupostos assumidos para simplificar o elevado volume de informação recolhida.

Os dados fornecidos incluem informação respetiva ao período de reestruturação das rotas – início de 2013 –, pelo que englobam rotas antigas e novas. A informação disponibilizada é referente a dados recolhidos entre Janeiro e Junho de 2013, contendo dados relativos: ao nível de enchimento dos ecopontos nas rotas realizadas; às quantidades totais de peso recolhido por cada circuito; à distância e tempo percorridos nos circuitos; e à lista de circuitos existentes com os ecopontos alocados a cada um.

Numa primeira fase, procedeu-se à organização dos dados, na medida em que foram selecionados unicamente os circuitos que tinham toda a informação necessária disponível (*e.g.* os circuitos que continham apenas dados do nível de enchimento ou apenas os totais de peso, distância ou tempo foram excluídos). De seguida, foram desconsiderados os circuitos que tinham a indicação de recolha de poucos ecopontos, por representarem falhas no registo. Por último, foram ainda excluídos da análise os antigos circuitos que abrangiam pontos de recolha que não integram a rede atual da Valorsul.

De seguida são analisados diversos parâmetros com o intuito de analisar o cenário atual e obter os *inputs* necessários à execução do modelo de rotas proposto para a reconfiguração da rede e das rotas.

### 6.1 Resíduos a recolher

No que respeita ao tratamento seletivo, a Valorsul apresenta rotas de recolha independentes para cada resíduo (papel/cartão, plástico/metal e vidro). Estes têm características que os distinguem entre si, como a densidade e a procura, que geram diferenças a nível da constituição das rotas alocadas a cada um, quer no número de ecopontos recolhidos quer no número de circuitos realizados.

Os dados tratados no corrente estudo têm foco único no papel/cartão. Por um lado, este é o resíduo com maior volume de dados disponíveis, permitindo uma maior amplitude de análise que não é possível com os restantes resíduos. Por outro lado, o procedimento tomado para a análise deste é idêntico aos restantes, pelo que, em caso de necessidade, é possível a extrapolação do estudo ao plástico/metal e vidro.

### 6.1.1 Densidade

A densidade teórica do papel/cartão é de  $40 \text{ kg/m}^3$  (valor indicado pela Valorsul). Numa primeira fase, com o intuito de confirmar a exatidão deste valor no contexto apresentado pela Valorsul, foi comparado o peso realmente recolhido com o peso recolhido teoricamente, tendo em conta a densidade fornecida. Para o cálculo da quantidade teórica total de resíduos recolhidos, recorreu-se à fórmula  $\rho = \frac{m_T}{V_T}$ , sendo que:  $\rho$  representa a densidade teórica do papel/cartão ( $\text{kg/m}^3$ );  $m_T$  respeita à quantidade tórica total de resíduos recolhidos (kg); e  $V_T$  refere-se à capacidade volúmica total ocupada dos contentores, segundo o registo dos motoristas.

Para calcular o valor de  $V_T$ , foi tido em conta que os contentores têm todos a mesma capacidade de  $2,5 \text{ m}^3$ . Seguidamente, através das percentagens do nível de enchimento dos ecopontos registadas pelos motoristas, foi possível obter o volume ocupado corresponde a esse mesmo nível de enchimento. A soma do volume ocupado de todos os ecopontos recolhidos em todas as rotas permitiu obter o valor da capacidade volúmica total ocupada dos contentores ( $V_T$ ). O cálculo do valor final de  $m_i$  tem por base o valor teórico da densidade de  $40 \text{ kg/m}^3$  e a soma das capacidades volúmicas ocupadas dos contentores, segundo os registos dos motoristas ( $V_T$ ). A multiplicação da densidade teórica pelo volume ocupado nos contentores permitiu determinar qual a quantidade teórica que os mesmos percursos deveriam ter recolhido.

Desta forma, teoricamente teriam de ser recolhidas 1970 toneladas que comparativamente às 1285 toneladas realmente recolhidas nos circuitos realizados durante os 5 meses de análise, verificou-se uma diferença de praticamente 700 toneladas. A diferença substancial entre o valor teórico e a quantidade verificada na prática poderá dever-se ao registo do nível de enchimento dos ecopontos que é feito a olho pelos motoristas. Esta questão levou à necessidade de determinação da densidade real do papel/cartão neste contexto, para se poder lidar com as mesmas quantidades recolhidas e tornar a comparação de modelos mais realista. Através da capacidade volúmica registada como ocupada no total dos ecopontos em cada percurso e o peso realmente recolhido nesses mesmos circuitos obteve-se uma densidade do resíduo para cada rota realizada. De seguida efetuou-se a média aritmética das densidades em todas as rotas consideradas, como exemplificado na Tabela 3.

| Rota | Capacidade Total Utilizada (m3) | Quantidade Total Recolhida (kg) | Densidade (kg/m3) |
|------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 21   | 137.5                           | 4500                            | 32.73             |
| 12   | 104.375                         | 1860                            | 17.82             |
| 26   | 137.5                           | 4520                            | 32.87             |
| 14   | 127.5                           | 3000                            | 23.53             |

Tabela 3 - Densidade do papel/cartão para cada rota.

Como apresentado na Tabela 4, o valor médio da densidade alcançado foi de 26.50 kg/m<sup>3</sup>, valor utilizado na restante análise efetuada, com um máximo de 48.86 kg/m<sup>3</sup>, um mínimo de 13.64 kg/m<sup>3</sup> e com um desvio padrão de 5.26 kg/m<sup>3</sup>.

|               | Densidade |
|---------------|-----------|
| Média         | 26.50     |
| Máximo        | 48.86     |
| Mínimo        | 13.64     |
| Desvio Padrão | 5.26      |

Tabela 4 - Resultados obtidos da densidade do papel/cartão.

## 6.2 Pontos de recolha

A Valorsul dispõe de 2123 ecopontos para o papel/cartão, que representam 2217 contentores dispersos pelos 14 municípios onde atua, na medida em que um ecoponto pode aglomerar vários contentores na mesma localização. Tendo em conta que o modelo matemático utilizado para a definição de rotas não fornece soluções convenientes com mais de 200 pontos de recolha (Ramos *et al.*, 2013), foi necessária a criação de *clusters* que aglomerassem os contentores com vista à sua recolha. Neste sentido, a aglomeração dos contentores foi feita com base nas freguesias onde estes estão inseridos, originando um total de 136 *clusters*. Como sucede na grande parte dos casos, os contentores dentro de uma mesma freguesia são recolhidos com a mesma frequência e de forma sequencial num mesmo circuito, logo o critério utilizado para a criação dos *clusters* fica, assim, validado.

Ainda que seja possível haver *clusters* com um reduzido número de ecopontos, estes não foram desconsiderados pela necessidade de máxima aproximação às condições atuais para facilitar e credibilizar futuras comparações entre ambos os modelos.



### 6.2.1 Quantidade a recolher por ponto de recolha

De modo a poder definir a frequência de recolha de cada ponto de recolha é necessário proceder ao cálculo da quantidade de resíduos a recolher em cada um desses mesmos pontos. A determinação desta quantidade passa por estimar a taxa de deposição média diária de resíduos em cada contentor.

Neste sentido, a Valorsul dispôs informação acerca de todos os circuitos efetuados nos primeiros cinco meses de 2013, como as datas da sua realização e o nível de enchimento de cada ecoponto recolhido em cada uma das rotas.

A título exemplificativo, a descrição desta etapa do tratamento de dados tem por base o ecoponto com o código 2 (Tabela 5), de forma a simplificar a explicação do processo tomado para todo o conjunto de pontos de recolha existente na rede Valorsul.

| Data     | CodEcoponto | Enchimento | Capacidade (m <sup>3</sup> ) | Capacidade Utilizada (m <sup>3</sup> ) | PesoEcoponto (kg) |
|----------|-------------|------------|------------------------------|--|-------------------|
| 17/01/13 | 2           | 0.5        | 2.5                          | 1.25                                   | 33.1195783        |
| 24/01/13 | 2           | 0.5        | 2.5                          | 1.25                                   | 33.1195783        |
| 04/02/13 | 2           | 1          | 2.5                          | 2.5                                    | 66.23915661       |
| 13/02/13 | 2           | 0.75       | 2.5                          | 1.875                                  | 49.67936745       |
| 21/02/13 | 2           | 0          | 2.5                          | 0                                      | 0                 |
| 18/03/13 | 2           | 1          | 2.5                          | 2.5                                    | 66.23915661       |
| 25/03/13 | 2           | 0.25       | 2.5                          | 0.625                                  | 16.55978915       |
| 02/04/13 | 2           | 0.25       | 2.5                          | 0.625                                  | 16.55978915       |
| 10/04/13 | 2           | 1          | 2.5                          | 2.5                                    | 66.23915661       |
| 18/04/13 | 2           | 0          | 2.5                          | 0                                      | 0                 |
| 14/05/13 | 2           | 1          | 2.5                          | 2.5                                    | 66.23915661       |
| 22/05/13 | 2           | 1          | 2.5                          | 2.5                                    | 66.23915661       |
| 30/05/13 | 2           | 0.5        | 2.5                          | 1.25                                   | 33.1195783        |
| 07/06/13 | 2           | 0.5        | 2.5                          | 1.25                                   | 33.1195783        |

Tabela 5 - Nível de enchimento do ecoponto 2.

Em primeira instância, os dados recolhidos foram agrupados por ponto de recolha, com o intuito de obter o valor médio de enchimento dos contentores recolhidos. Seguindo o exemplo acima demonstrado, calculou-se a média aritmética dos níveis de enchimento observados em todos os circuitos em que o ecoponto 2 foi recolhido, obtendo-se o valor médio de 59%. Partindo do pressuposto apresentado de que todos os contentores existentes têm uma capacidade total de 2.5 m<sup>3</sup>, foi possível aferir a capacidade volúmica média realmente utilizada nos pontos de recolha – neste exemplo foi de 1.47 m<sup>3</sup> (59% da capacidade total).

Através da densidade do papel/cartão calculada – 26.50 kg/m<sup>3</sup> – foi possível chegar ao aos 66.2 kg como valor máximo de peso que um ecoponto pode suportar. Nesta medida,

para o ecoponto descrito, os 59% de enchimento médio representam 39kg de resíduos depositados no conjunto dos circuitos.

Numa segunda fase, contabilizaram-se as datas em que os ecopontos foram recolhidos, por forma a obter o número de vezes que o mesmo sucedeu e o intervalo de tempo entre a primeira e a última vez em que o circuito onde está inserido foi percorrido. No caso retratado, o ecoponto 2 foi recolhido 14 vezes, ao longo de 140 dias (diferença entre a data de realização do último e do primeiro circuito menos 1 dia). Este ponto de recolha foi, assim, recolhido em média de 10 em 10 dias ao longo dos 5 meses em estudo (140 dias sobre as 14 vezes que o circuito foi percorrido).

Isto representa que o ecoponto 2, em média, a cada 10 dias, foi recolhido com um nível de 59% de enchimento que representam 39 kg de papel/cartão. Por fim, para o cálculo da taxa de deposição média diária, foi dividido o peso médio recolhido em cada ecoponto pelo intervalo de tempo médio obtido,  $39/10=3.9$  kg. Neste contexto são depositados, em média, 3.9 kg de papel/cartão diariamente no ecoponto 2. Este processo foi replicado para os restantes ecopontos, obtendo as taxas de deposição média por dia para cada um dos contentores que serviram de base ao cálculo da frequência das rotas a serem definidas numa fase posterior.

### **6.3 Frequência de recolha**

Para a determinação das frequências que sustentaram a definição das rotas, foram pré-estabelecidas 4 possíveis frequências para a realização dos percursos – 7, 14, 21 ou 28 dias. Estas frequências definidas dizem respeito ao intervalo de tempo, em dias, entre recolhas sucessivas. De outro modo, a uma frequência de 7 dias está associada uma frequência mensal média de 4 vezes, à de 14 dias está associada a realização de rotas em média duas vezes por mês e, assim, sucessivamente. Este pressuposto tomado considera um mês como tendo 28 dias, permitindo simplificar o processo de análise exaustiva da informação disponibilizada, bem como servir de sustento à construção de um modelo de rotas mais organizado e estruturado.

De seguida, foi tido a consideração o limite máximo de capacidade volúmica e, conseqüentemente de peso, de cada ecoponto, pelo que foi entendido que não seria possível que, numa situação normal, os pontos de recolha pudessem exceder esse mesmo limite de 66.2 kg de papel/cartão ao fim do número de dias estabelecido como frequência.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

Para o cálculo da frequência a estipular para a recolha de cada ecoponto, multiplicou-se o valor previamente obtido da quantidade média de deposição diária aos vários números de dias referentes às frequências consideradas como possíveis. De seguida, tendo em conta os pressupostos supracitados, a frequência de cada ecoponto foi definida através da comparação da quantidade a recolher com a capacidade máxima em peso. Isto significa que a frequência estipulada é correspondente ao número de dias necessários para obter o maior nível de enchimento, sem exceder a capacidade. Na Tabela 6 estão representados alguns exemplos de ecopontos com diferentes frequências, onde é possível constatar que a frequência corresponde ao número de dias máximo possível antes que a capacidade seja excedida.

| CodEcoponto | MediaPesoDiario | CodFreguesia | Frequência | 7           | 14          | 21          | 28          |
|-------------|-----------------|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2386        | 6.01            | 1            | <b>7</b>   | 42.05660737 | 84.11321474 | 126.1698221 | 168.2264295 |
| 1195        | 4.51            | 1            | <b>14</b>  | 31.54245553 | 63.08491105 | 94.62736658 | 126.1698221 |
| 2110        | 2.68            | 1            | <b>21</b>  | 18.77527115 | 37.55054229 | 56.32581344 | 75.10108459 |
| 1881        | 0.54            | 1            | <b>28</b>  | 3.755054229 | 7.510108459 | 11.26516269 | 15.02021692 |

Tabela 6 - Alocação das frequências aos contentores.

De forma sucinta, o modelo de cálculo da frequência seguiu uma sequência de condições, tomando como ponto de partida a maior das frequências: caso se esperasse que o ecoponto estivesse a um nível inferior a 100%, ou seja, menos de 66.2 kg em resíduos, era definida a frequência de 28 dias; caso se esperasse um nível de enchimento superior ao limite máximo, era testada a frequência de 21 dias e a lógica de decisão era idêntica à anterior, sendo replicada doravante. Alcançada a frequência mínima possível, qualquer ecoponto com a capacidade excedida ao fim de 14 dias era definido como sendo recolhido ao fim de 7 dias.

Após fazer corresponder as frequências aos pontos de recolha, estes últimos foram organizados pelos *clusters* respetivos. Sabendo que todos os contentores dentro de uma freguesia têm de ser recolhidos de forma sequencial numa mesma rota, é-lhes atribuída a mesma frequência de recolha. De modo a nunca exceder a capacidade máxima, o critério de definição da frequência para cada freguesia foi o da frequência mínima existente em cada *cluster*. No exemplo acima demonstrado, os vários ecopontos com diferentes frequências pertencem à mesma Freguesia 1. Através dos critérios criados, a frequência definida para a Freguesia 1 foi de 7 dias.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

Nenhuma das freguesias consideradas tinha uma procura superior à capacidade do veículo no dia definido para a recolha, não havendo um tratamento diferenciado para qualquer freguesia.

Em suma, na Tabela 7 é apresentada a distribuição das freguesias pela frequência atribuída para o cenário I.

|    | Freguesias |
|----|------------|
| 7  | 64         |
| 14 | 51         |
| 21 | 12         |
| 28 | 9          |

Tabela 7 - Número de freguesias alocadas a cada frequência no cenário I.

Para o cenário II, foram alocadas novas frequências. Foi calculada uma percentagem de ecopontos existentes em cada frequência, tendo em conta o total de ecopontos inseridos em cada freguesia. De seguida foi determinada a percentagem acumulada dos ecopontos em cada uma das frequências definidas no cenário I, partindo da frequência de 28 dias até à frequência de 7 dias. Tomando o exemplo apresentado na Tabela 8, se no cenário I a freguesia 2 era satisfeita de 7 em 7 dias, por ser a frequência mínima existente no conjunto de ecopontos, a nova frequência foi estabelecida quando a percentagem acumulada atingia pelo menos os 80% de ecopontos satisfeitos no tempo certo. No caso da freguesia 2, todos os ecopontos passaram a ser satisfeitos de 14 em 14 dias.

| Frequência | Contentores | Percentagem de contentores | Percentagem acumulada |
|------------|-------------|----------------------------|-----------------------|
| 7          | 5           | 19%                        | 100%                  |
| 14         | 8           | 31%                        | 81%                   |
| 21         | 4           | 15%                        | 50%                   |
| 28         | 9           | 35%                        | 35%                   |

Tabela 8 - Definição de frequências no cenário II – exemplo da freguesia 2.

Assim, no cenário II as freguesias alocadas a cada freguesia tomaram a seguinte disposição (Tabela 9).

|    | Freguesias |
|----|------------|
| 7  | 34         |
| 14 | 60         |
| 21 | 32         |
| 28 | 10         |

Tabela 9 - Número de freguesias alocadas a cada frequência no cenário II.

## 6.4 Tempo de circuito

O tempo de percurso das rotas depende de diferentes fatores: distância percorrida entre as freguesias e entre os próprios ecopontos dentro de cada localidade; velocidade ao longo do percurso; número de pontos de recolha, tempo de carregamento dos resíduos em cada um dos pontos; e tempo de descarga do veículo no final de cada rota. Esta duração total de um circuito pode ser dada pela seguinte fórmula:

$$\text{Duração Total} = \frac{\text{Distância entre freguesias}}{\text{Velocidade entre freguesias}} + \frac{\text{Distância dentro das freguesias}}{\text{Velocidade dentro das freguesias}} + n^{\circ} \text{ contentores} \times \text{tempo de recolha} + \text{tempo de descarga}$$

Considerou-se que a velocidade ao longo de todo o percurso, não é constante, na medida em que o território abrangido é tão vasto que os veículos circulam quer por zonas urbanas onde a velocidade tem de ser mais reduzida, quer fora das localidades onde é possível atingir velocidades superiores. Neste seguimento, tomou-se como pressuposto que no interior das localidades os veículos circulam a uma velocidade média de 30 km/h e, no exterior destas, a 60 km/h. Mais uma vez, por forma a simplificar os cálculos, as velocidades médias de circulação foram consideradas como constantes nos locais mencionados.

Relativamente aos tempos de carga e de descarga do veículo, foi definido, com recurso a informação da Valorsul, que os tempos seriam, respetivamente, de 2 minutos, por cada ecoponto recolhido, e 15 minutos.

## 6.5 Distâncias

Como supracitado, o tempo de percurso de cada circuito depende das distâncias percorridas dentro e fora das freguesias. Neste sentido o cálculo das distâncias seguiu duas fases distintas: o cálculo da distância percorrida nas zonas urbanas através da distância média entre ecopontos; e da distância percorrida fora das localidades através do método euclidiano.

### 6.5.1 Distâncias dentro das freguesias

A distância percorrida no interior das localidades é dada pela distância entre os pontos de recolha multiplicada pelo número de ecopontos a recolher. Partindo dos valores de distância percorrida em cada circuito realizado, das velocidades consideradas e, sabendo que:

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

$$\text{Distância Total} = \text{Distância dentro das freguesias} + \text{Distância entre freguesias}$$

, foi possível calcular a distância percorrida dentro das freguesias colocando a fórmula de cálculo da duração total em ordem à distância a obter.

$$DdF = \frac{[Duração_T - (n^{º}ecop \times T_{recolha}) - (T_{descarga})] \times (VeF \times VdF) - (Distância_T \times VdF)}{VeF - VdF}$$

Legenda:

*DdF* - Distância dentro das Freguesias

*Distância<sub>T</sub>* - Distância total do circuito

*Duração<sub>T</sub>* - Duração total do circuito

*Nºecop* - Número de ecopontos a recolher

*T<sub>recolha</sub>* - Tempo de recolha de um ecoponto

*T<sub>descarga</sub>* - Tempo de descarga do veículo

*VeF* - Velocidade percorrida entre Freguesias

*VdF* - Velocidade percorrida dentro das Freguesias

Deste modo, foi possível determinar a distância percorrida pelos veículos dentro das freguesias em cada um dos circuitos realizados. Seguidamente, dividindo a este valor o número de ecopontos recolhidos ao longo a rota, calculou-se a distância entre ecopontos para cada um dos circuitos.

Exemplificando, na Tabela 10 estão representados dois dos circuitos 21 e 24 realizados, a distância total e duração total percorridas, bem como as distâncias entre e dentro das freguesias, e entre os pontos de recolha.

| Data     | Circuito | Km Totais | Horas Totais | Distância entre Freguesias (km) | Distância dentro da Freguesia (km) | Nº Ecopontos | Distância entre Ecopontos |
|----------|----------|-----------|--------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------|---------------------------|
| 11/01/13 | 21       | 152       | 6h11m        | 94                              | 58                                 | 73           | 0.79                      |
| 14/01/13 | 24       | 216       | 7h59m        | 122                             | 94                                 | 77           | 1.22                      |

Tabela 10 - Distância entre freguesias por rota.

O processo foi replicado para os restantes circuitos, determinando, por fim, a média aritmética das distâncias encontradas que resultaram na definição de 1 km como distância média entre os ecopontos dentro de uma localidade.

### 6.5.2 Distâncias entre freguesias

O modelo testado na corrente dissertação tem como *inputs* os valores das distâncias que separam todas as freguesias a percorrer, pelo que o total da distância percorrida entre as freguesias calculada na fase anterior é insuficiente. Nesta fase foram, assim, determinadas as distâncias entre todas as freguesias, as distâncias entre as freguesias e as bases de veículos (atualmente estações de transferência) e, ainda, as distâncias entre os depósitos e a CTRO. Neste contexto, há um dos depósitos que se situa na própria CTRO, pelo que foi considerada a mesma localização para ambas as instalações.

Neste seguimento, através das coordenadas geográficas de localização de cada freguesia, simbolizadas pelo centro do próprio *cluster*, de cada depósito e da CTRO foram contruídas matrizes-distância. De forma a simplificar o cálculo, as distâncias são dadas através do método euclidiano, distância em linha reta entre os pontos, sendo aproximadas, de seguida, à distância real através de um fator de circuito.

Assim, a distância entre dois pontos dá-se através da seguinte fórmula:  $Distância_{ab} = \sqrt{(lon_a - lon_b)^2 + (lat_a - lat_b)^2} \times 87 \text{ km} \times 1,4$ , onde os 87 km representam o fator de conversão de graus a quilómetros e o 1,4 o fator de circuito de aproximação à distância real (Simchi-Levi, *et al.*, 2008).

### 6.6 Veículos de recolha

Para a recolha do resíduo do papel/cartão, a Valorsul tem à disposição 9 veículos com 3 tipologias distintas. Tendo em conta a capacidade volúmica e de peso de cada tipo de veículos foi necessário calcular qual o fator limitativo da carga a transportar: se o volume, se o peso do resíduo.

| Veículo | Número de veículos | Capacidade volúmica (m3) | Capacidade em peso (kg) | Densidade que esgota ambas as capacidades (kg/m3) |
|---------|--------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| I       | 2                  | 15                       | 4465                    | 279   |
| II      | 5                  | 20                       | 5580                    | 697   |
| III     | 2                  | 20                       | 13945                   | 750   |

Tabela 11 - Densidade que esgota ambas as capacidades dos veículos.

É possível notar na Tabela 11 que, independentemente do tipo de veículo, o que limita a quantidade de carga a transportar é o volume, porque a densidade do papel/cartão compactado – 250 kg/m<sup>3</sup>, dado fornecido pela Valorsul – é sempre inferior à densidade que esgota ambas as capacidades simultaneamente. Assim é preciso calcular qual a

quantidade de peso correspondente à capacidade volúmica máxima do veículo, tendo em conta a densidade do papel/cartão compactado (Tabela 12).

| Veículo | Densidade do papel/cartão compactado (kg/m <sup>3</sup> ) | Capacidade volúmica (m <sup>3</sup> ) | Limite máximo de capacidade (kg) |
|---------|---|---------------------------------------|----------------------------------|
| I       | 250   | 15                                    | 3750                             |
| II      | 250   | 20                                    | 5000                             |
| III     | 250   | 20                                    | 5000                             |

Tabela 12 - Limite máximo de capacidade em peso dos veículos.

Os veículos que permitem transportar uma maior quantidade de resíduos são o tipo II e o tipo III, com 5000 kg, sendo as capacidades consideradas no desenvolvimento do modelo de rotas adiante. No que respeita aos veículos que transportam os resíduos dos depósitos para a CTRO, considerou-se uma capacidade máxima de 10000 kg de papel/cartão.

## 6.7 Conclusões

O tratamento dos dados fornecidos pela Valorsul serviu de base para o cálculo dos *inputs* da construção e execução do modelo, cujos resultados são apresentados na secção seguinte. Estes *inputs* passaram pelas distâncias necessárias, definição de frequências de recolha, definição de velocidades e tempos de operação.



## 7. Análise de resultados

Nesta secção são descritos, analisados e comparados os resultados dos três cenários em estudo – o atualmente adotado e os dois cenários que se baseiam no modelo em estudo na presente dissertação.

### 7.1 Cenários considerados

O primeiro cenário abordado é o atual modelo adotado pela Valorsul que apenas admite um depósito para cobrir todos os pontos de recolha, cujas rotas realizadas são na sua totalidade fechadas.

Para verificar a eficácia do modelo em estudo foram criados dois cenários. Um primeiro que se suporta em 7 depósitos, com a realização de rotas mistas, garantindo um nível de serviço ótimo para o contexto apresentado, considerado como nível de 100% de serviço doravante. Quer-se com isto entender, que no contexto definido, todos os contentores são recolhidos nas frequências determinadas como as indicadas. As 7 bases de veículos posicionam-se nas seguintes localidades: Alenquer, Nazaré, Óbidos, Peniche, Rio Maior, Sobral de Monte Agraço e o atualmente utilizado situado na CTRO. O segundo cenário parte das mesmas premissas, mas avalia os ganhos associados à adoção de um modelo com 80% de nível de serviço, implicando necessariamente que 20% dos pontos de recolha são coletados mais tarde do que a frequência estabelecida inicialmente como ótima.

Sendo que o *software* utilizado para a execução do algoritmo admite que todos os pontos de recolha considerados são coletados na mesma frequência, o modelo foi executado 4 vezes para cada cenário, onde cada uma corresponde a uma frequência de recolha – 7, 14, 21 e 28 dias. Neste estudo não surgiu a necessidade de correr o modelo com a conjugação de grupos de freguesias com diferentes frequências, na medida em que localidades com frequências distintas não têm necessidade de ser servidas num mesmo dia. Se por um lado, não existem recursos em termos de veículos para que tal suceda, por outro lado a cada frequência pode ser alocado um dia diferente da semana para percorrer as rotas necessárias.

A execução do algoritmo teve três fases distintas como previamente descrito: uma primeira fase caracterizada pela execução de um algoritmo exato para a obtenção das rotas e os quilómetros correspondentes; e uma segunda fase de determinação de tempos de percurso; e uma terceira fase que envolve a aplicação de uma heurística de correção

para as rotas que superam as 8 horas máximas de percurso. Nestes casos, foi necessário ajustar as freguesias alocadas a cada rota

### 7.1.1 Cenário atual

A análise do cenário atual – modelo adotado atualmente – é realizada exclusivamente com os dados fornecidos pela Valorsul. Os resultados obtidos através do tratamento dos dados serviram como base de comparação para os restantes cenários criados. Desta forma, foram analisados os critérios de comparação para futura avaliação da eficácia de cada um dos modelos em estudo: quilometragem percorrida, os tempos de realização das rotas, a quantidade de resíduos recolhidos em termos de peso e o número de rotas necessárias para satisfazer a procura. Foram tidos em consideração outros dois indicadores de *performance*, como a percentagem de ocupação dos veículos e a quantidade de resíduos em quilograma por cada quilómetro transitado.

Os resultados seguidamente apresentados na Tabela Tabela 13 surgem como médias aritméticas dos valores obtidos por rota e por mês.

|                    |                                       | Valor  |
|--------------------|---------------------------------------|--------|
| Mês                | Número de ecopontos recolhidos        | 7354.4 |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 236296 |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 576    |
|                    | Distância percorrida (km)             | 11615  |
| Rota               | Número de ecopontos recolhidos        | 86.6   |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 2824.9 |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 6.9    |
|                    | Distância percorrida (km)             | 138.4  |
| <i>Performance</i> | Ocupação do veículo (%)               | 56%    |
|                    | Peso recolhido por quilómetro (kg/km) | 20.3   |

Tabela 13 - Resultados totais no cenário atual.

Em termos mensais, nos 84 circuitos realizados, a quantidade total recolhida de papel/cartão ronda as 236 toneladas, num total de 576 horas efetuadas ao longo de quase 12 mil quilómetros percorridos. A nível da *performance*, em média os veículos terminam os percursos com cerca de 56% da capacidade preenchida, recolhendo uma média de 20.3 quilogramas por cada quilómetro que percorrem. Ainda, cada rota tem em média praticamente 7 horas de duração ao longo de 138.4 quilómetros médios transitados.

### 7.1.1.1 Cenário I

Como supracitado, este cenário consiste no aumento da rede de depósitos para 7, onde os veículos podem realizar rotas abertas ou fechadas, sendo que o nível de serviço é considerado como sendo de 100%, ou seja, todos os pontos de recolha são recolhidos na frequência inicialmente definida sem nunca excederem a sua capacidade máxima de 100%.

Relativamente aos resultados sobre as rotas ótimas a realizar, ainda sem a restrição de tempo (Fase 1 e Fase 2), são apresentados na Tabela 14 os resultados respetivos ao número de rotas obtidas como ótimas para satisfazer a procura determinada previamente, bem como o número de rotas sujeitas à aplicação da heurística de melhoria (Fase 3).

|           |                                      | Frequência |         |         |         |
|-----------|--------------------------------------|------------|---------|---------|---------|
|           |                                      | 7          | 14      | 21      | 28      |
| Cenário I | Rotas totais                         | 12         | 4       | 2       | 2       |
|           | Rotas que superam as 8 horas máximas | 8          | 3       | 0       | 0       |
|           | Km totais                            | 693.129    | 434.941 | 150.263 | 107.098 |

Tabela 14 - Número de rotas sujeitas à heurística de melhoria no cenário I.

É possível verificar que das 12 rotas são necessárias para satisfazer a procura das freguesias com frequência de 7 dias, 8 das mesmas excediam as 8 horas máximas de um turno de trabalho. O mesmo se sucedeu com 3 das 4 rotas realizadas com frequência de 14 dias. Desta forma, foram sujeitas à heurística de melhoria, no total, 11 das 20 rotas obtidas, nesta primeira instância. Assim, para a frequência de 7 dias, obtiveram-se 15 rotas finais (que não excedem as 8 horas), que são repetidas 4 vezes ao longo do mês, perfazendo um total de 60 rotas por mês.

Das 11 rotas sujeitas à Fase 3, tomou-se o seguinte exemplo de procedimento. À quarta rota do conjunto de rotas com frequência 14 neste cenário foram retiradas as últimas duas freguesias (49 e 52), e adicionadas a outras freguesias retiradas às restantes rotas com excesso de tempo percorrido, formando uma nova rota 5, que até então não era considerada (ver Figura 9).

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

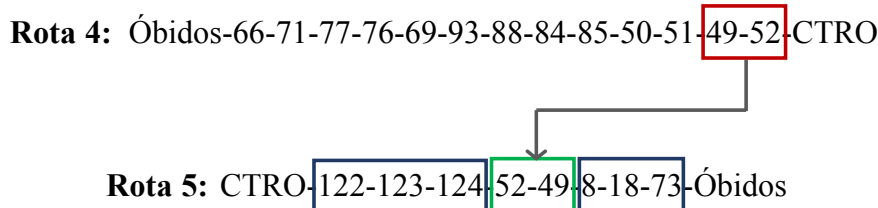


Figura 9 - Exemplo da aplicação da heurística na Fase 3.

Assinaladas a vermelho estão as freguesias que foram excluídas da rota inicial 4, sendo transferidas para uma nova rota, passando a estar assinaladas a verde na figura. As freguesias marcadas a azul são provenientes das restantes rotas iniciais que também superavam o limite das 8 horas. A nova rota 5 foi, por fim, definida e organizada tendo em conta as distâncias entre as mesmas e entre estas e os depósitos.

Os resultados finais, ou seja, após a aplicação de todas as fases, são expressos nas tabelas seguintes – Tabela 15 e Tabela 16 – onde, respetivamente, são apresentados os resultados por frequência de recolha e os valores totais deste primeiro cenário.

|             |                                       | Frequência |        |        |        |
|-------------|---------------------------------------|------------|--------|--------|--------|
|             |                                       | 7          | 14     | 21     | 28     |
| Mês         | Número de ecopontos recolhidos        | 6684       | 926    | 73     | 28     |
|             | Quantidade recolhida (kg)             | 168976     | 33665  | 3205.3 | 1080   |
|             | Tempo Percorrido (horas)              | 434.9      | 75.4   | 7.7    | 3.4    |
|             | Distância percorrida (km)             | 4724.8     | 1118   | 200.3  | 107.1  |
| Rota        | Número de ecopontos recolhidos        | 111.4      | 92.6   | 27.5   | 14     |
|             | Quantidade recolhida (kg)             | 2816.3     | 3366.5 | 1202   | 540    |
|             | Tempo Percorrido (horas)              | 7.25       | 7.54   | 2.88   | 1.69   |
|             | Distância percorrida (km)             | 78.7       | 111.8  | 75.13  | 53.549 |
| Performance | Ocupação do veículo (%)               | 56%        | 67%    | 24%    | 11%    |
|             | Peso recolhido por quilómetro (kg/km) | 35.8       | 30.1   | 16.0   | 10.1   |

Tabela 15 - Resultados por frequência no cenário I.

|              | Nº rotas  | Rotas abertas | Rotas fechadas |
|--------------|-----------|---------------|----------------|
| 7            | 60        | 28            | 32             |
| 14           | 10        | 8             | 2              |
| 21           | 3         | 0             | 3              |
| 28           | 2         | 0             | 2              |
| <b>Total</b> | <b>75</b> | <b>36</b>     | <b>39</b>      |

Tabela 16 – Número de rotas abertas e fechadas no cenário I.

Analisando os dados obtidos é possível verificar que a frequência que tem mais impacto nos resultados totais é a de 7 dias pelo que é quando a maior parte das freguesias são

recolhidas e o número de contentores recolhidos é bastante mais elevado, comparativamente às restantes freguesias.

No que respeita ao valor médio de quantidade recolhida por rota, é superior no conjunto de rotas percorridas com frequência 14, na medida em que o número de rotas realizadas é bastante inferior ao número de rotas realizadas com frequência 7, 10 e 60 rotas num mês respetivamente.

Quanto aos indicadores de *performance* é possível verificar que são bastante reduzidos nas frequências 21 e 28 dias, em comparação às restantes. Isto deve-se ao facto de a quantidade a recolher nas freguesias com estas frequências são bastantes reduzidas, não enchendo a capacidade do veículo de forma expressiva.

Em suma neste caso é possível observar que a frequência que apresenta melhores resultados é a de 14 dias, sendo aquela que consegue obter maiores níveis de enchimento do veículo de recolha, ainda que a quantidade de resíduos recolhida por quilómetro seja ligeiramente inferior àquela obtida no grupo de rotas realizadas com frequência 7.

Em termos de rotas (ver Anexo 3), no total existem 24 rotas diferentes a serem realizadas, mais 4 do que as obtidas inicialmente sem restrições temporais, cada uma com a sua frequência respetiva. Isto totaliza ao final do mês 75 percursos realizados, dos quais 48% terminam num depósito distinto daquele que iniciaram e os restantes 52% têm fim no mesmo ponto de começo. As frequências 21 e 28 não contêm qualquer rota aberta devido à proximidade das poucas freguesias a recolher, que impede que haja necessidade do veículo se afastar do depósito de começo. Como exemplo, na Tabela 17 são apresentadas duas rotas abertas com frequência de 7 dias.

| Rota                       | Tempo | Capacidade do veículo ocupada |
|----------------------------|-------|-------------------------------|
| Nazaré-1-6-15-72-65-Óbidos | 401   | 2292                          |
| Peniche-97-89-125-81-CTRO  | 409   | 2324                          |

Tabela 17 - Exemplos de rotas abertas no cenário I.

Relativamente aos totais obtidos (Tabela 18), foi observado que no total dos 28 dias considerados, são recolhidas cerca de 207 toneladas de resíduos, num total de tempo de cerca de 521 horas. Para recolher os 7711 contentores num mês, os veículos necessitam de percorrer 6150 quilómetros.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

O tempo de percurso médio por rota obtida é de 6 horas e 30 minutos, bem abaixo das 8 horas máximas, permitindo alguma flexibilidade, caso fatores externos influenciem o normal percurso dos veículos. Os indicadores de performance do *modelo* são de 55% para a percentagem de ocupação média do veículo no conjunto total de rotas efetuadas num mês e de 33.6 quilogramas recolhido por cada quilómetro efetuado.

|             |  | Total    |
|-------------|--|----------|
| Mês         | Número de ecopontos recolhidos           | 7711.3   |
|             | Quantidade recolhida (kg)                | 206926.4 |
|             | Tempo Percorrido (horas)                 | 521.3    |
|             | Distância percorrida (km)                | 6150.3   |
| Rota        | Número de ecopontos recolhidos           | 92.4     |
|             | Quantidade recolhida (kg)                | 2606.7   |
|             | Tempo Percorrido (horas)                 | 6.5      |
|             | Distância percorrida (km)                | 83.2     |
| Performance | Ocupação do veículo (%)                  | 55%      |
|             | Resíduo recolhido por quilómetro (kg/km) | 33.6     |

Tabela 18 - Resultados totais no cenário I.

Nos mapas seguintes estão representadas as freguesias alocadas a cada depósito durante um mês. A cada depósito estão alocadas todas a freguesia com que haja relação, isto é, freguesias que pertencem a uma rota que tenha início ou término no depósito em causa.

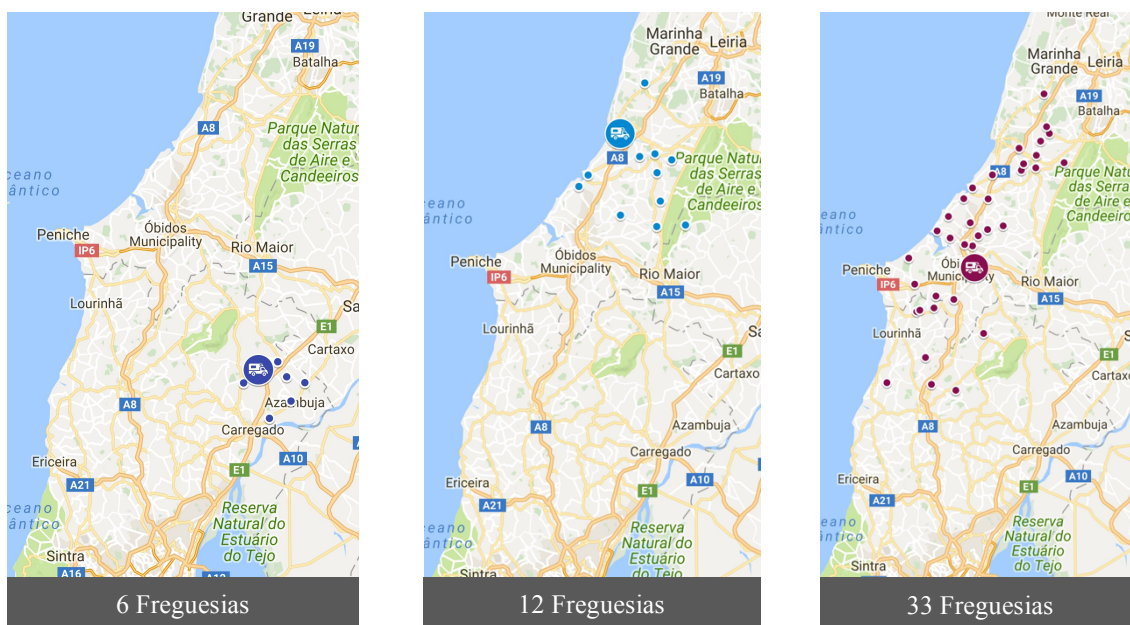


Figura 10 - Áreas de influências dos depósitos A, B, C no cenário I.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

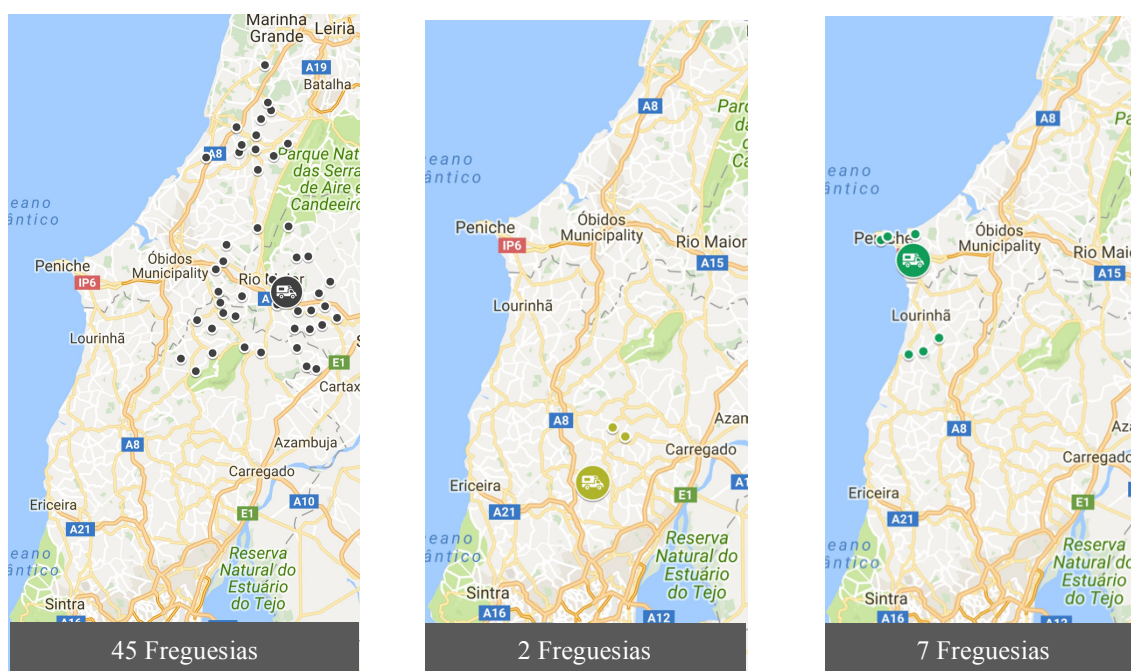


Figura 11 - Áreas de influências dos depósitos D, E, F no cenário I.



Figura 12 - Área de influência do depósito G no cenário I.

Nos mapas presentes nas Figuras Figura 10, Figura 11 e Figura 12, os depósitos têm as seguintes nomenclaturas: A – Alenquer; B - Nazaré; C - Óbidos; D – Rio Maior; E – Sobral de Monte Agraço; F - Peniche; G - CTRO.

Na observação das áreas de influência de cada depósito considerado no problema é possível verificar que praticamente metade das freguesias (48%) está inserida em rotas que começam ou terminam no depósito da CTRO. As duas bases de veículos que também

têm uma área considerável, são os de Óbidos e Rio Maior, com 16% e 22% respetivamente. Os restantes 4 depósitos no seu todo representam apenas 13% do território total a satisfazer. Denota-se que o depósito existente atualmente continua a ser o que predomina em termos de utilização devido à sua localização. Ainda, o facto de os resíduos terem de ser transportados posteriormente para a CTRO pode também influenciar o algoritmo a centralizar os pontos de recolha neste depósito.

### 7.1.1.2 Cenário II

Neste segundo cenário, a redução do nível de serviço para 80% obrigou a alteração das frequências de certos pontos de recolha, sendo observados os resultados obtidos seguidamente.

No que respeita às rotas que necessitam de aplicação da heurística de melhoria para adequar os tempos de percursos, são apresentados na Tabela 19 os resultados respetivos a este segundo cenário.

|            |   | Frequência |       |         |        |
|------------|---|------------|-------|---------|--------|
|            |   | 7          | 14    | 21      | 28     |
| Cenário II | <b>Rotas totais</b>                         | 10         | 8     | 3       | 1      |
|            | <b>Rotas que superam as 8 horas máximas</b> | 5          | 1     | 1       | 0      |
|            | <b>Km totais</b>                            | 479.7      | 621.5 | 316.369 | 125.23 |

Tabela 19 - Número de rotas sujeitas à heurística de melhoria no cenário II.

Neste cenário for necessário intervir em menos rotas aplicando a Fase 3, comparativamente ao cenário anterior. Metade das rotas de frequência 7 necessitou de intervenção, bem como 1 rota do conjunto alocado à frequência 14 e 21. Assim, no total interveio-se no total de 7 rotas.

Os resultados totais por frequência relativos ao cenário II são expressos nas tabelas seguintes (Tabela 20 e Tabela 21) e analisados seguidamente.



## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

|             |                                  | Frequência |        |        |        |
|-------------|----------------------------------|------------|--------|--------|--------|
|             |                                  | 7          | 14     | 21     | 28     |
| Mês         | Numero de ecopontos recolhidos   | 4564       | 757    | 377.3  | 36     |
|             | Quantidade recolhida (kg)        | 118740     | 61192  | 17160  | 1419   |
|             | Tempo Percorrido (horas)         | 274.4      | 115.1  | 22.96  | 4.15   |
|             | Distância percorrida (km)        | 3204.4     | 1530.8 | 535.72 | 125.23 |
| Rota        | Numero de ecopontos recolhidos   | 95.08      | 94.625 | 70.75  | 36     |
|             | Quantidade recolhida (kg)        | 2473.75    | 3824.5 | 3217.5 | 1419   |
|             | Tempo Percorrido (horas)         | 5.72       | 7.20   | 4.30   | 4.15   |
|             | Distância percorrida (km)        | 66.8       | 95.7   | 100.45 | 125.23 |
| Performance | Ocupação do veículo (%)          | 49%        | 76%    | 64%    | 28%    |
|             | Recolhido por quilómetro (kg/km) | 37.1       | 40.0   | 32.0   | 11.3   |

Tabela 20 - Resultados por frequência no cenário II.

|              | Nº rotas  | Rotas abertas | Rotas fechadas |
|--------------|-----------|---------------|----------------|
| 7            | 48        | 16            | 32             |
| 14           | 16        | 4             | 12             |
| 21           | 5         | 4             | 1              |
| 28           | 1         | 0             | 1              |
| <b>Total</b> | <b>70</b> | <b>24</b>     | <b>46</b>      |

Tabela 21 - Número de rotas abertas e fechadas no cenário II.

Neste segundo cenário as rotas encontram-se mais distribuídas pelas diferentes frequências, resultando numa maior uniformização entre resultados obtidos. As frequências de 21 e 28 dias apresentam neste cenário maior percentagem de ocupação de veículo, com 64% e 28% respetivamente.

Bem como acontece no primeiro dos cenários, é o conjunto de rotas realizadas com frequência de 14 dias que apresenta os dados mais otimizados, na medida em que, com menos rotas realizadas, consegue recolher uma maior quantidade média de resíduos recolhidos por rota. Estes valores traduzem-se ainda na percentagem de ocupação média do veículo – 76% - e de quantidade recolhida por quilómetro – 40 kg/km.

No que respeita às rotas efetuadas (ver Anexo 4), ainda que haja um aumento da distribuição das mesmas pelas frequências, comparando ao cenário anterior, a diferença de rotas abertas e fechadas aumentou de forma expressiva. Neste cenário, apenas 34% das rotas terminam num ponto distinto do inicial. Para esta diferença contribuíram as rotas com frequência 7, que ao diminuírem em número, foram reorganizadas de tal forma a percorrem menos distâncias, não se afastando o suficiente do depósito inicial para terminarem num depósito distinto.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

Em termos de totais (Tabela 22), ainda que semelhantes aos obtidos no cenário anterior, surgem algumas diferenças que é necessário realçar.

|                    |                                       | Total    |
|--------------------|---------------------------------------|----------|
| <b>Mês</b>         | Número de ecopontos recolhidos        | 5734.3   |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 198511.0 |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 416.6    |
|                    | Distância percorrida (km)             | 5396.1   |
| <b>Rota</b>        | Número de ecopontos recolhidos        | 89       |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 2982.8   |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 5.9      |
|                    | Distância percorrida (km)             | 83.7     |
| <b>Performance</b> | Ocupação do veículo (%)               | 65%      |
|                    | Peso recolhido por quilómetro (kg/km) | 36.8     |

Tabela 22 - Resultados totais no cenário II.

A quantidade total recolhida, bem como o número de contentores recolhidos é ligeiramente inferior. Isto deve-se ao facto de alguns contentores serem recolhidos mais tarde que inicialmente, representando que os mesmos sejam recolhidos menos vezes por mês.

É de realçar, ainda, que a quantidade recolhida em média por cada rota é superior à obtida no modelo anterior, devido à redução no número de rotas efetuadas. Isto reflete-se ainda na percentagem de ocupação do veículo que aumenta para 65%.

De seguida são ainda apresentados os mapas que refletem as áreas de intervenção de cada depósito (Figura 13, Figura 14 e Figura 15).

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

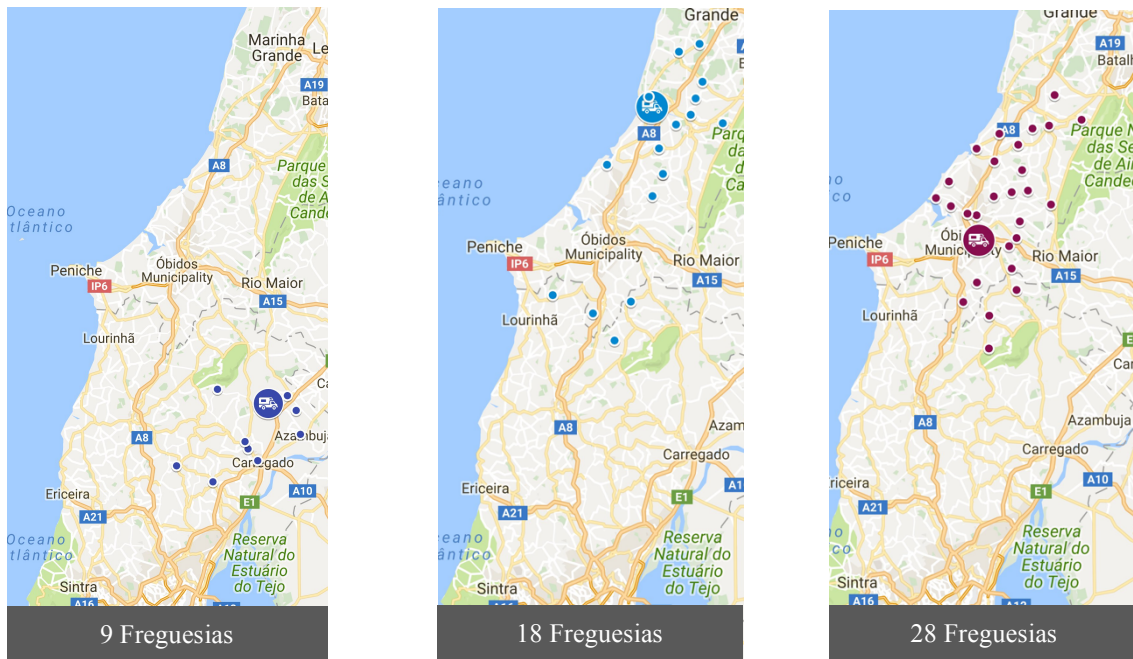


Figura 13 - Áreas de influências dos depósitos A, B e C no cenário II.

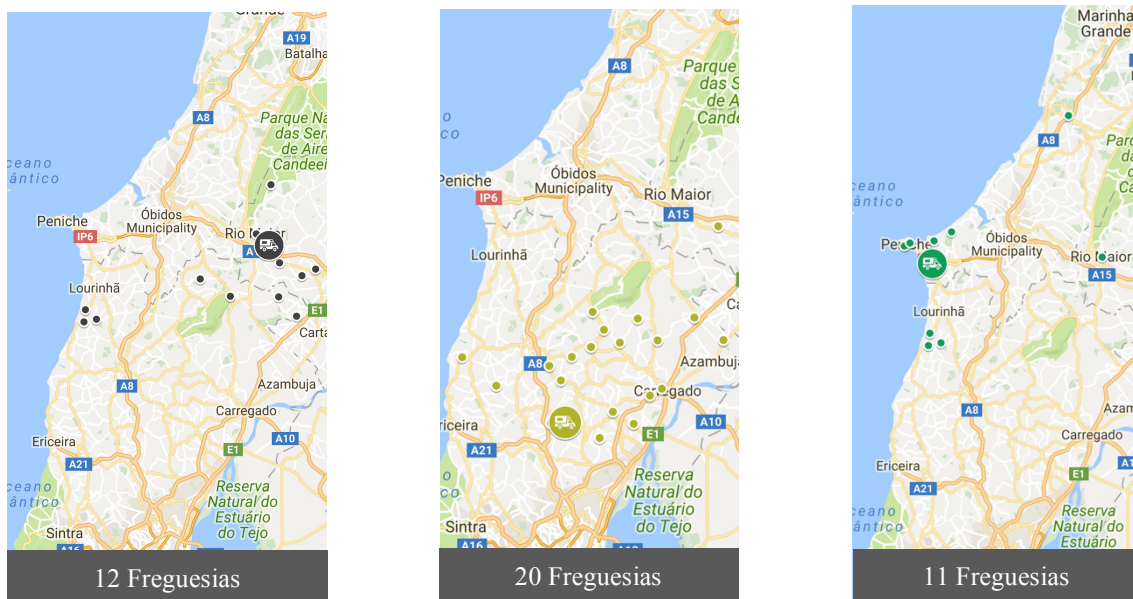


Figura 14 - Áreas de influências dos depósitos D, E e F no cenário II.



Figura 15 - Área de influência do depósito G no cenário II.

Neste cenário, o depósito da CTRO continua a ser aquele com maior influência, com 49% das freguesias a estarem inseridas numa rota onde este depósito está também incluído. No que respeita aos restantes, apesar de estarem mais equiparados, continua a haver 5 dos 6 depósitos que individualmente abrangem menos de 10% de área total.

### 7.1.1.3 Comparação de resultados

Neste separador são analisadas, de forma mais detalhada, as principais diferenças observadas entre os três cenários em estudo, o atual e os dois alternativos criados. Esta análise tem em conta os indicadores determinados como forma de comparação: distância percorrida; duração total; percentagem de ocupação dos veículos; e quantidade recolhida por quilómetro.

Para efeitos de comparação, o modelo atual não segue a mesma definição de frequência definidas nos cenários alternativos (7,14, 21, 28 dias), pelo que são apenas analisados os totais mensais obtidos para cada um dos modelos.

Abaixo estão expostas duas tabelas: Tabela 23 que apresenta o resumo dos valores obtidos em cada indicador para os três cenários existentes; e a Tabela 24 que reflete em percentagem as diferenças entre o cenário atual e o cenário I, bem como entre o atual e o cenário II.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

|               | Quantidade Recolhida (kg) | Distância Percorrida (km) | Duração Total (horas) | % Ocupação do veículo | Quantidade média recolhida por quilômetro (kg/km) | Número de Rotas efetuadas |
|---------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------|
| Cenário Atual | 236296                    | 11615                     | 576                   | 56%                   | 20.34   | 84                        |
| Cenário I     | 206926                    | 6150                      | 521                   | 55%                   | 33.65   | 75                        |
| Cenário II    | 198511                    | 5396                      | 417                   | 65%                   | 36.79   | 70                        |

Tabela 23 - Comparação de resultados mensais entre o cenário atual e os cenários I e II.

|            | Quantidade Recolhida (kg) | Distância Percorrida (km) | Duração Total (horas) | % Ocupação do veículo | Quantidade média recolhida por quilômetro (kg/km) | Número de Rotas efetuadas |
|------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------|
| Cenário I  | -12.4%                    | -47.0%                    | -9.5%                 | -1.5%                 | 65.4%   | -11.1%                    |
| Cenário II | -16.0%                    | -53.5%                    | -27.7%                | 16.2%                 | 80.8%   | -16.3%                    |

Tabela 24 - Variação de resultados mensais dos cenários I e II face ao cenário atual.

Ao analisar as tabelas de resultados é possível constatar uma diferença na quantidade total de resíduos recolhidos entre os três cenários, que à partida não deveria existir. Esta pode ser justificada através do modelo de frequências utilizado para estudar os cenários alternativos que admite que um mês tem 28 dias. Desta forma, a diferença reside nos restantes dois ou três dias não contabilizados nos dois cenários alternativos.

As principais diferenças observadas entre os modelos encontram-se nos principais indicadores de comparação. Cumprindo os 100% de nível de serviço, o modelo estudado permite poupar 47% em termos de quilometragem percorrida e com 80% de nível de serviço, a poupança é 53.5% face ao modelo utilizado atualmente. Esta poupança observada é justificável pelo aumento do número de depósitos que permitem abranger toda a área de intervenção de uma forma mais equilibrada. Ainda assim, a redução também observada a nível de tempo não acompanha de forma tão expressiva a redução de quilómetros percorridos. Este assunto é abordado mais adiante na discussão de resultados.

Quanto aos principais indicadores de *performance*, observa-se uma ligeira queda na percentagem de ocupação no cenário I, isto deve-se principalmente às rotas de frequência 21 e 28 dias que apresentam valores de nível de ocupação suficiente baixos para não compensar os valores elevados obtidos nos grupos de rotas com as restantes frequências de 7 e 14 dias.

Em suma, apesar de ambos apresentarem melhorias significativas em grande parte dos indicadores, é possível afirmar que no segundo cenário as diferenças de resultados são mais expressivas. Contudo, não é possível afirmar logo à partida qual é o melhor modelo a adotar, porque garantir apenas 80% do serviço aos clientes pode trazer outras implicações, para além da clara poupança em termos de quilómetros e tempo, como exceder a capacidade máxima de um contentor. O estudo deste cenário teve como o intuito de dar a conhecer os efeitos da redução do nível de serviço, para que possa ser ponderada essa possibilidade pelas empresas de recolha de resíduos. Assim, foi o cenário I o selecionado para uma análise preliminar de custos e de sensibilidade, para avaliar a eficácia e sustento do modelo, na medida em que num futuro próximo não é considerado pela Valorsul a adoção de um modelo que possa prejudicar o serviço oferecido aos seus clientes.

#### 7.1.1.4 Poupança de custos

Nesta secção foi realizada uma análise preliminar do valor financeiro poupado com a adoção de um modelo com múltiplos depósitos, traduzindo em euros a poupança em termos de quilómetros e tempo percorridos à luz dos dias de hoje.

Nesta medida foi considerado o preço médio do combustível no ano de 2015 como sendo de 1.223 €/L. A média de consumo de combustível por um veículo de 20 m<sup>3</sup> é de 0.6 l/km, segundo Fernandes (2009). Este valor parece ser plausível, tendo em conta o valor defendido por outros autores: 0.55 l/km por Rhoma *et al.* (2010) e 0.66 l/km por Carvalho (2010). Foi ainda considerado o custo horário de uma equipa de recolha (motorista e ajudante) de 6.7 €/hora por cada trabalhador - valor médio apresentado num projeto de investigação levado a cabo pela Universidade de Aveiro em 2011 (ver Tabela 25).

|                           | Valor |
|---------------------------|-------|
| Gasolina (€)              | 1.223 |
| Média de consumo (l/km)   | 0.6   |
| Nº horas poupadas (horas) | 55    |
| Custo Pessoal/hora (€/h)  | 6.7   |
| km poupados (km)          | 5465  |

Tabela 25 - Pressupostos do cálculo da poupança efetuada.

Tomando como poupadas as 55 horas obtidas no cenário I, relativamente ao cenário atual, e os 5465 quilómetros a menos percorridos foi possível obter um valor de cerca de 4750€

poupados por mês. É claro que esta análise não engloba todos os custos inerentes à execução deste novo modelo, como o custo de reestruturação das estações de transferência para poderem receber resíduos de recolha diferenciada e o custo de manutenção dos veículos. Ainda assim, é possível determinar o valor associado à redução do número de horas e quilómetros efetuados.

### 7.1.2 Análise de sensibilidade

Neste tópico é apresentada uma análise de sensibilidade ao cenário I, sob duas frentes distintas: numa primeira instância foi estudado o impacto do aumento da procura em 15% e a da redução da mesma em 15% no modelo aplicado; e numa segunda parte foi estudada a possibilidade otimização dos resultados alcançados através da agregação das frequências de 21 e 28 dias, devido às reduzidas percentagens obtidas em ambas.

#### 7.1.2.1 Variação da procura

É importante salientar que na alteração da procura nos ecopontos estudada nesta análise de sensibilidade não foi considerada a alteração das frequências, como foi realizado no segundo cenário estudado, de forma não aumentar a complexidade da análise.

Nas tabelas seguintes são apresentadas as tabelas resumo dos valores obtidos para cada indicado (Tabela 26) bem como a tabela com as percentagens de variação entre o cenário I e o aumento e redução da procura (Tabela 27).

|           | Quantidade Recolhida (kg) | Distância Percorrida (km) | Duração Total (horas) | % Ocupação do veículo | Quantidade média recolhida por quilómetro (kg/km) | Número de Rotas efetuadas |
|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------|
| Cenário I | 206926                    | 6150                      | 521                   | 55%                   | 33.65   | 75                        |
| -15%      | 169422                    | 6037                      | 514                   | 43%                   | 28.06   | 79                        |
| 15%       | 235084                    | 6076                      | 521                   | 58%                   | 38.69   | 81                        |

Tabela 26 - Resultados mensais da análise de sensibilidade.

|      | Distância Percorrida (km) | Duração Total (horas) | % Ocupação do veículo | Quantidade média recolhida por quilómetro (kg/km) | Número de Rotas efetuadas |
|------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---|---------------------------|
| -15% | -1.8%                     | -1.4%                 | -21.9%                | -16.6%  | 5.4%                      |
| 15%  | -1%                       | 0%                    | 6%                    | 15%   | 8%                        |

Tabela 27 - Variação de resultados mensais da análise de sensibilidade face ao cenário I.

Analisando os resultados obtidos é possível observar algumas variações nos diferentes indicadores. As maiores diferenças encontram-se na percentagem de ocupação do veículo

que reduz significativamente quando a procura decresce em 15%. Este valor é justificável, pois os contentores são todos recolhidos na mesma, mas com menor nível de enchimento. Isto é, nos mesmos quilómetros percorridos este recolhe menos quantidade, sendo este fator refletido quer na percentagem de ocupação do veículo, quer na quantidade recolhida por quilómetro. Inversamente, o mesmo também se verifica quando a procura cresce em 15%.

Ainda, o método utilizado na terceira fase de obtenção de dados, a heurística de ajuste das rotas que é feita manualmente através do aumento do número de rotas, quando estas excedem o tempo máximo permitido de 8 horas, também pode justificar a queda acentuada do nível de ocupação dos veículos. Neste caso, houve a necessidade de acrescentar algumas rotas aos resultados iniciais, o que provocou a diminuição da quantidade média recolhida por rota e consecutivamente a diminuição abrupta do nível de ocupação do veículo.

Contudo, é possível observar que as diferenças observadas são esperadas, pelo que é possível considerar que o modelo estudado, no contexto estudado da Valorsul, tem condições necessárias para poder ser implementado num sistema de recolha seletiva de resíduos.

### **7.1.2.2 Agregação de frequências**

Nesta segunda análise surgiu a necessidade de agregar as frequências de 21 e 28 dias numa só frequência, dado os resultados pouco significativos verificados nestas quando tratadas de forma isolada.

Nesta medida, foi considerado que todas as freguesias com frequência de recolha de 21 e 28 dias passariam a ser satisfeitas a cada 21 dias. A frequência definida prende-se com o facto de que os contentores com frequência 21 não poderem ser recolhidos mais tarde, por excederem a capacidade máxima.

Neste contexto os resultados obtidos por frequência são apresentados na Tabela 28, bem como o número de percursos realizados em cada tipo de rotas (Tabela 29).



RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

|                    |                                       | Frequência |        |        |
|--------------------|---------------------------------------|------------|--------|--------|
|                    |                                       | 7          | 14     | 21     |
| <b>Mês</b>         | Número de ecopontos recolhidos        | 6684       | 926    | 111    |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 168976     | 33665  | 4285.3 |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 434.9      | 75.4   | 10.6   |
|                    | Distância percorrida (km)             | 4724.8     | 1118   | 234.6  |
| <b>Rota</b>        | Número de ecopontos recolhidos        | 111.4      | 92.6   | 83     |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 2816.3     | 3366.5 | 3214   |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 7.25       | 7.54   | 7.93   |
|                    | Distância percorrida (km)             | 78.7       | 111.8  | 175.94 |
| <b>Performance</b> | Ocupação do veículo (%)               | 56%        | 67%    | 64%    |
|                    | Peso recolhido por quilómetro (kg/km) | 35.8       | 30.1   | 18.3   |

Tabela 28 - Resultados por freguesias agregadas

|              | Nº rotas | Rotas abertas | Rotas fechadas |
|--------------|----------|---------------|----------------|
| 7            | 60       | 28            | 32             |
| 14           | 10       | 8             | 2              |
| 21           | 1        | 0             | 1              |
| <b>Total</b> | 71       | 36            | 35             |

Tabela 29 - Número de rotas abertas e fechadas com frequências agregadas.

Analisando os dados obtidos através desta agregação de frequências, observa-se nos indicadores indicados ligeiras melhorias. As reduzidas percentagens de ocupação do veículo previamente verificadas são agora substituídas por uma ocupação de 64%, indo ao encontro daquelas verificadas nas restantes frequências. Estas melhorias respeitam também ao peso médio recolhido por quilómetro que, ainda que não esteja equiparado aos restantes, é mais robusto que os valores obtidos inicialmente (16 e 10.1 kg/km, respetivamente para as frequências 21 e 28 dias).

Relativamente ao número de rotas abertas e fechadas, esta agregação permite a divisão em praticamente 50% dos tipos de rotas, ou seja, metade das rotas verificadas num mês terminam no mesmo depósito onde começaram e a restante metade termina numa base de veículos distinta.

Os resultados totais do modelo com a agregação das duas frequências também sofreram algumas melhorias que merecem destaque, representadas em valor na Tabela 30. É ainda demonstrada a tabela com as variações de resultados entre o cenário I e o cenário com as frequências agregadas (Tabela 31).

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

|                    |                                       | Total    |
|--------------------|---------------------------------------|----------|
| <b>Mês</b>         | Número de ecopontos recolhidos        | 7720.7   |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 206926.4 |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 520.9    |
|                    | Distância percorrida (km)             | 6077.4   |
| <b>Rota</b>        | Número de ecopontos recolhidos        | 106      |
|                    | Quantidade recolhida (kg)             | 2966.2   |
|                    | Tempo Percorrido (horas)              | 7.3      |
|                    | Distância percorrida (km)             | 91.2     |
| <b>Performance</b> | Ocupação do veículo (%)               | 58%      |
|                    | Peso recolhido por quilómetro (kg/km) | 34.0     |

Tabela 30 - Resultados totais com freguesias agregadas.

|                               | Quantidade Recolhida (kg) | Distância Percorrida (km) | Duração Total (horas) | % Ocupação do veículo | Quantidade recolhida por quilómetro percorrido (kg/km) | Número de Rotas efetuadas |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---------------------------|
| Cenário Frequências Agregadas | 0%                        | -1.2%                     | -0.1%                 | 5.6%                  | 1.2%   | -4.5%                     |

Tabela 31 - Variação de resultados entre o cenário I e o cenário com frequências agregadas.

Globalmente, a agregação das frequências de 21 e 28 dias revela benefícios para o modelo criado. Ao longo de um mês de recolha a distância percorrida decresce em 1.2%, representado em valor cerca de 80 quilómetros. A melhoria mais significativa prende-se com o nível médio de ocupação do veículo, ao crescer 5.6% e perfazendo os 58% que superam também os 56% obtidos através do modelo atualmente adotado.

### 7.1.3 Resultados computacionais

Neste subcapítulo são apresentados os resultados computacionais obtidos no *software* utilizado – GAMS –, para a primeira fase de obtenção de resultados.

Desta forma, nas Tabelas Tabela 32 e Tabela 33 são apresentados os resultados para a Fase 1 referentes aos dois cenários criados, bem como os resultados obtidos na análise de sensibilidade efetuada para o cenário I.

|            | Periodicidade | Nº de Variáveis | Nº de Variáveis binárias | Nº de Restrições | Iterações | Tempo de execução (seg) | Desvio à solução ótima (%) | Valor ótimo |
|------------|---------------|-----------------|--------------------------|------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|-------------|
| Cenário I  | 7             | 12,099          | 5,446                    | 18,321           | 17310075  | 12843.52                | 3.11%                      | 671.544     |
|            | 14            | 8,394           | 3,705                    | 12,731           | 20183889  | 10639.49                | 0%                         | 434.941     |
|            | 21            | 1,335           | 468                      | 2,045            | 10296     | 0.014                   | 0%                         | 150.262     |
|            | 28            | 1,044           | 345                      | 1,601            | 0         | 0.07                    | 0%                         | 107.098     |
| Cenário II | 7             | 4,596           | 1,906                    | 6,951            | 172561    | 46.95                   | 0%                         | 479.668     |
|            | 14            | 10,887          | 4,884                    | 16,493           | 3492804   | 2000.11                 | 4.38%                      | 594.259     |
|            | 21            | 4,195           | 1,748                    | 6,385            | 5085718   | 769.96                  | 0%                         | 316.368     |
|            | 28            | 1,137           | 384                      | 1,743            | 324       | 0.25                    | 0%                         | 125.23      |

Tabela 32 - Resultados computacionais obtidos para os cenários I e II.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

|      | Periodicidade | Nº de Variáveis | Nº de Variáveis binárias | Nº de Restrições | Iterações | Tempo de execução (seg) | Desvio à solução ótima (%) | Valor ótimo |
|------|---------------|-----------------|--------------------------|------------------|-----------|-------------------------|----------------------------|-------------|
| -15% | 7             | 12,099          | 5458                     | 18,321           | 3640505   | 2000.01                 | 3.56%                      | 611.328     |
|      | 14            | 8,394           | 3705                     | 12,731           | 5348636   | 2000.11                 | 2.15%                      | 412.658     |
|      | 21            | 1,335           | 468                      | 2,045            | 7837      | 0.708                   | 0%                         | 148.915     |
|      | 28            | 1,044           | 345                      | 1,601            | 0         | 0.143                   | 0%                         | 106.075     |
| 15%  | 7             | 12,099          | 5414                     | 18,321           | 4300558   | 2000.16                 | 5.25%                      | 714.541     |
|      | 14            | 8,394           | 3705                     | 12,731           | 5285911   | 2000.09                 | 0.77%                      | 445.787     |
|      | 21            | 1,335           | 468                      | 2,045            | 6301      | 0.594                   | 0%                         | 151.61      |
|      | 28            | 1,044           | 345                      | 1,601            | 223       | 0.146                   | 0%                         | 108.12      |

Tabela 33 - Resultados computacionais para a análise sensibilidade efetuada ao cenário I.

É de referir ainda que os valores obtidos como ótimos, não foram necessariamente os utilizados, na medida em que nos casos em que o desvio à solução não era de 0% foi utilizado esse mesmo Valor da Função Objetivo para o tempo de execução. Para o estudo em causa foram utilizados os resultados realmente obtidos no tempo de execução, isto é, os resultados ótimos com o indicado desvio à solução ótima.

Como é possível verificar, a dimensão do problema tem impactos nos tempos de execução e nos desvios à solução ótima. Os problemas das frequências 21 e 28 são executados num bastante reduzido espaço de tempo, por serem problemas com expressão reduzida. O mesmo não se verifica nos problemas com frequência 7 e 14, nos quais foi necessário, por vezes, limitar o tempo de execução.

Nestes problemas de grande volume, a partir de certo tempo de execução o desvio ao ótimo sofre alterações pouco significativas, pelo que o limite de tempo foi definido segundo o critério de obter um desvio ao ótimo inferior a 5%. Nos casos em que ao fim de 2000 segundos o desvio ao ótimo não cumpria o critério definido, o tempo de computação era aumentado. O problema de frequência de 7 dias com um aumento na procura de 15% não tem um desvio inferior aos 5%, pois mesmo com o aumento do tempo de execução, o desvio ao ótimo não sofria alterações de relevo.

## 8. Discussão de resultados

Através do estudo de um modelo alternativo à configuração da rede logística (aumento do número de depósitos) e das respectivas rotas (possibilidade de realizar rotas abertas), no contexto da Valorsul, foi possível apurar resultados que globalmente otimizam o modelo atualmente adotado pela Valorsul.

Como referido anteriormente, a poupança em termos de distância no cenário I é bastante significativa (redução de 47%). Ainda assim, é necessário referir que a distância otimizada diz maioritariamente respeito àquela efetuada entre as freguesias, na medida em que a distância efetiva entre contentores mantém-se inalterada. A distância dentro das freguesias é, no entanto, também encurtada relativamente ao cenário atual através da reorganização das rotas, que exige que todos os ecopontos sejam recolhidos sequencialmente, modelo esse que não era seguido na totalidade pela Valorsul.

É possível notar que a poupança em termos de tempo (redução de 9.5%) não acompanha de forma linear a redução obtida na quilometragem (redução de 47%). Desta forma, é possível inferir que grande parte do tempo do percurso respeita ao tempo de recolha dos ecopontos propriamente dito. É, assim, necessário assegurar que os ecopontos são recolhidos na frequência devida, pois recolher um ecoponto antes do tempo apropriado pode implicar que este seja recolhido mais vezes durante um mês acrescentando tempo ao total percorrido mensalmente.

Ainda assim, é possível verificar que uma redução em praticamente 30 minutos no tempo médio de duração de uma rota tem impactos em grande escala, ao serem reduzidas 55 horas de tempo de percurso ao fim de cada mês.

Foi ainda possível verificar que um modelo com a agregação de frequências com reduzidas freguesias a satisfazer (neste caso de 21 e 28 dias) compensa, quer em termos de homogeneização dos indicadores de performance nas várias frequências, quer em termos de otimização relativa aos resultados obtidos globalmente, em termos de tempo e quilometragem percorrida. A análise de sensibilidade realizada vem também confirmar que ligeiras variações na procura não perturbam de forma significativa o modelo estudado, podendo este ser considerado como um modelo sólido, na medida em que tem flexibilidade para se adaptar a possíveis alterações aos *inputs* do modelo.

Analisando os resultados obtidos, à luz dos modelos estudados pela comunidade científica, é possível conferir que estes vão ao encontro de muitos estudos realizados, ao passo que permitem colmatar algumas falhas recorrentes nos sistemas de gestão de resíduos urbanos.

Este modelo *multi-depot* que admite a possibilidade de os veículos realizarem rotas abertas e/ou fechadas (MDVRP-MCO), otimizando a distância total percorrida, vem acompanhar a necessidade de integrar mais os diferentes processos de um sistema de recolha de resíduos, referida como medida-chave pelo PERSU 2020. Ao fazer uso das estações de transferência, que atualmente servem como pontos de descarga do processo de recolha indiferenciada, atividades de processos distintos de recolha convergem em pontos comuns, podendo potencializar a utilidade das infraestruturas já existentes sem acrescer em demasia os custos associados à mesma.

Considerando ainda as quantidades totais recolhidas de papel/cartão num mês, que representam cerca de 2500 toneladas de resíduos ao fim do ano, e sabendo que a procura dos restantes dois resíduos – plástico/metal e vidro – rondam a mesma ordem de grandeza de valor, pelos dados fornecidos pela Valorsul, é possível verificar que a quantidade recolhida anualmente dos três resíduos é inferior às 13200 toneladas anuais que Bohm *et al.* (2010) refere. Isto significa que as quantidades totais recolhidas permitem a existência de economias de escala ao centralizar e integrar atividades, compensando a reciclagem relativamente à deposição em aterros.

A redução significativa dos quilómetros necessários para satisfazer toda a área de intervenção era um objetivo de elevada relevância, tendo em conta que os custos associados às atividades de recolha e transporte representam a maior fatia nos custos gerais (80%). Como referido por Markov *et al.* (2014), foi possível verificar que pequenas melhorias nestas atividades podem ser significativas na poupança de custos – com a redução em 30 minutos do tempo médio de percurso estimou-se a diminuição em 55 horas por mês. Estas 55 horas, na prática, representam 110 horas poupadas em termos de valor monetário, na medida em que a cada percurso estão alocados dois colaboradores.

Como mencionado inicialmente, a produção de resíduos sofreu um aumento exponencial nos últimos, ainda que no último par de anos tenha sido verificada uma ligeira descida. Os dados obtidos através da análise de sensibilidade realizada ao modelo estudado na presente dissertação, permitem fazer face a possíveis alterações quer crescentes quer decrescentes na procura dos resíduos, conferindo a robustez que um modelo necessita

para ser considerado por uma organização cuja procura tem um elevado nível de incerteza.

Em suma, no contexto apresentado, os resultados deste modelo vão ao encontro da poupança e otimização observadas no primeiro estudo que considerou a possibilidade de haver rotas mistas num mesmo sistema logístico, retratado por Ramos *et al.* (2013).

Contudo, não é demais referir que num modelo desta natureza podem também surgir alguns constrangimentos que carecem de análise. Apesar de o corrente estudo ter por base alterações consideráveis a nível estratégico que permitem a integração e otimização do processo de recolha, como a aumento do número de depósitos da rede de recolha, há questões de carácter operacional que surgem como consequência destas alterações.

O facto de os veículos poderem terminar em depósitos distintos daqueles que iniciaram o percurso, implica que os motoristas também terminem o seu turno de trabalho distantes do ponto inicial. Isto pode afetar a satisfação destes colaboradores na medida em que podem estar sujeitos a não conseguirem regressar às suas casas no final do dia, sendo obrigados a pernoitar num local distinto. Como alternativa, a poupança significativa de quilómetros percorridos permite a realização de uma rota extra do depósito de término até ao depósito inicial sem afetar drasticamente os tempos e os quilómetros percorridos, como será referido nas perspetivas de estudo futuras.

No que respeita às áreas de influência é possível constatar que apenas o depósito da CTRO mantém a relevância em ambos os cenários, isto é, mantém uma elevada expressão na área de intervenção nos dois cenários estudados. Pelo contrário, os depósitos de Alenquer, Nazaré e Peniche, mantêm áreas de influência de reduzido impacto. Em ambos os cenários a distribuição das freguesias pelos depósitos é bastante dispersa.

Neste sentido, o modelo é suficientemente flexível para ajustar o número de depósitos necessários, caso seja pretendido aumentar o nível de utilização de cada base de veículos, reduzindo o seu número de infraestruturas. Este prevê ainda a necessidade de exclusão ou inclusão de novos ecopontos ou freguesias na sua área de intervenção, de modo a poder reorganizar as rotas a percorrer para satisfazer a procura de forma otimizada.

## 9. Conclusões e perspectivas futuras

A produção de resíduos é inevitável em qualquer sociedade, quer em ambientes de elevado desenvolvimento, quer em países subdesenvolvidos. Se por um lado, cabe aos cidadãos alterar o modo de produção dos mesmos, por outro cabe às empresas responsáveis pela recolha definir estratégias de acompanhamento às alterações constantes nesta indústria, quer a nível de procura, quer a nível da legislação que cada vez mais obriga a maiores cuidados relativos à sustentabilidade económica, social e ambiental dos sistemas de resíduos.

Sendo esta uma indústria com preocupações crescentes a nível da otimização do seu processo logístico, nomeadamente nas atividades de recolha e transporte dos resíduos por representarem a maior fatia dos custos totais de um sistema logístico, foi necessário numa primeira instância entender que estudos têm sido abordados pela comunidade científica e selecionar um modelo com potencial de progressão neste tipo de sistema.

Nesta medida, entre inúmeras variantes existentes para o estudo de problemas de definição de rotas, foi estudado um modelo ainda pouco abordado, desenvolvido por Ramos *et al.* (2013). Este admite a possibilidade de os veículos de recolha realizarem rotas quer fechadas, quer abertas, isto é, que tenham fim num ponto distinto do inicial, numa rede de múltiplos depósitos.

A viabilidade deste modelo foi estudada no contexto da Valorsul, por ser a empresa de recolha de resíduos que lida com a recolha de maior volume de resíduos a nível nacional, para o resíduo papel/cartão. Este estudo foi desenvolvido num contexto de grande volume de dados fornecidos, sendo que o foco apenas no papel/cartão permitiu facilitar a observação e análise dos resultados obtidos. Ainda assim, o estudo foi desenvolvido com o intuito e possibilidade de extrapolação do mesmo a outros resíduos e outras empresas do mesmo setor.

Os resultados obtidos permitem aferir a possibilidade de otimização proposta como objetivo inicial do estudo, quer em termos de quilometragem percorrida, quem em termos de tempo efetuado, tendo impacto nos custos associados ao modelo, como verificada na análise preliminar ao valor de poupança na implementação de um modelo desta natureza.

Através dos cenários criados foi possível concluir que este é um modelo flexível, na medida em que permite variações à procura sem ter impactos significativos nos

resultados, sendo este um ponto de partida para a possibilidade extrapolação do modelo a outros sistemas de gestão de resíduos. Ainda assim, o modelo obriga a que a procura seja constantemente revista, na medida em que esta é o principal *input* a definição das rotas.

Este estudo permite ainda ir ao encontro das necessidade e metas europeias estipuladas de promoção da integração das atividades dos processos de recolha seletiva e indiferenciada e a partilha de infraestruturas, através da utilização das estações de transferência como bases de veículos para a recolha seletiva de resíduos.

Neste contexto, o estudo teve algumas limitações que podem ter influenciado de alguma forma os resultados obtidos. Ainda assim, alguns dos pressupostos tomados foram necessários para a progressão do estudo, sob pena de acrescer bastante complexidade ao mesmo. Algumas das limitações encontradas predem-se com: as distâncias nos cenários criados que foram definidas tendo por base as distâncias euclidianas com um fator de circuito que permitiu aproximar à realidade, mas que ainda assim não são as reais distâncias percorridas pelos veículos entre as freguesias; as frequências estipuladas, na medida em que considerando apenas as quatro mencionadas, podem estar a ser desconsiderados ecopontos que carecem de recolha a uma frequência intermédia, ao passo que são desconsiderados ainda os restantes dias do mês, além dos 28 dias considerados.

Ainda o *software* GAMS utilizado para obter os resultados, ao permitir apenas considerar 200 pontos de recolha obrigou a criação de *clusters*, alguns dos quais com muitos contentores incluídos. O facto de este impossibilitar a restrição do tempo logo à partida, impôs também a criação de uma nova fase com a aplicação de uma heurística que de certa forma impediu a obtenção de resultados ótimos que o algoritmo exato utilizado devolve.

O modelo em si também levanta algumas questões de carácter social, que se prendem com os colaboradores que ao terminarem num ponto distinto daquele que começam a rota são forçados a percorrerem longas distâncias para retornarem à sua zona de residência ou a pernoitarem fora do seu domicílio.

Neste sentido surgem, de seguida, algumas propostas de futuras análises que visam consolidar o estudo decorrido na presente dissertação.



## 9.1 Perspetivas futuras

Tendo em conta as limitações e as consequências que advém da aplicação de um modelo desta natureza, surge a necessidade de reforçar este estudo com uma análise mais detalhada dos custos inerentes à implementação do mesmo: uma análise financeira que avalie os custos associados à utilização destas infraestruturas já existentes.

Com o intuito de completar a análise realizada pode ainda ser alargado o estudo à avaliação das poupanças a nível ambiental através do modelo cuja importância cresceu nos últimos anos - *Green VRP*. Estudar os impactos ambientais associados a um modelo cuja otimização de tempo e quilómetros percorridos pode trazer novos *inputs* significativos à comunidade científica. Por um lado, carecem estudos multiobjectivo (otimização económica e redução do impacto ambiental, por exemplo), por outro lado confere uma solidez ao modelo por considerar mais variáveis que podem afetar o sistema.

Existe ainda um leque de oportunidades de estudo como a definição de novas frequências de recolha para distribuir melhor os pontos de recolha, garantido que estes são coletados no tempo devido, poupando ainda mais ineficiências a nível do tempo efetuado. Isto permite impedir que haja frequências com poucas rotas, como verificado na análise de agregação de frequências, que possam gerar alguns problemas a nível da definição de horários dos colaboradores. Em alternativa, pode também ser estudada a possibilidade de aumentar a capacidade dos contentores com maior procura, de forma a não forçar a recolha de todos os ecopontos de uma única freguesia mais cedo do que o tempo previsto e, conseqüentemente, aumentar a percentagem da ocupação do veículo.

Numa segunda instância, pode ser ainda equacionada a aplicação do modelo apenas com os depósitos com maior nível de intervenção e percentagem de utilização – CTRO, Óbidos e Rio Maior –, por forma a reduzir possíveis custos associados à ocupação de mais infraestruturas, apesar de poder implicar o acréscimo no número de quilómetros percorridos.

Numa terceira perspetiva, de modo a poder evitar os constrangimentos sociais mencionados associados ao modelo, surgem duas perspetivas de estudo. Por um lado, a análise operacional da sincronização das rotas e horários dos motoristas, na medida em que pode haver a necessidade de efetuar uma rota de seguida (ou no dia seguinte) com começo no mesmo ponto de término da rota anterior, não compensando a deslocação do motorista até à base de veículos inicial. Esta análise é essencial, pois não é claro que possa

compensar a realização destas rotas extra, ao poder implicar um acréscimo excessivo na quilometragem. Do ponto de vista contrário, o pernoitar do motorista e ajudante, além de acarretar alguns custos de estadia, levanta ainda questões de carácter social.

Por outro lado, pode ser estudada a possibilidade de implementar um modelo *MDVRP with inter-depot routes* que, ao invés dos veículos terminarem as suas rotas no ponto distinto do inicial, estes têm uma paragem a certa altura durante a rota que permite descarregar o veículo (nas Estações de Transferência) e voltar à realização do percurso com a capacidade do veículo totalmente renovada, terminando no mesmo ponto de começo. Este modelo evita os problemas associados à distância a que os motoristas ficam dos seus domicílios, ao passo que admite na mesma a existência de novos depósitos de descarga, mas que não servem como bases de veículos.

## Referências bibliográficas

- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. 2015. A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97: 76-92.
- APA. 2013. *Resíduos Urbanos - Relatório Anual 2012*. Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente.
- Angelelli, E., & Speranza, M. G. 2002. The application of a vehicle routing model to a waste collection problem: Two case studies. *Journal of the Operational Research Society*, 53(9): 944-952.
- Banerjea-Brodeur, M., Cordeau, J. F., Laporte, G., & Lasry, A. 1998. Scheduling linen deliveries in a large hospital, *Journal of Operations Research Society*, 49(8): 777-780.
- Baptista, S., Oliveira, R., & Zúquete, E. 2002. A period vehicle routing case study. *European Journal of Operational Research*, 139(2): 220-9.
- Bautista, J., & Pereira, J. 2004. *Ant algorithms for urban waste collection algorithms*. Paper presented at the Ants workshop, 3172: 302-309.
- Bektaş, T., & Elmastaş, S. 2007. Solving school bus routing problems through integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, 58(12): 1599-1604.
- Beliën, J., Boeck, L., & Ackere, J. 2012. Municipal solid waste collection and management problems: A literature review. *Transportation Science*, 48(1): 78-102.
- Beltrami, E. J., & Bodin, L. 1974. Networks and vehicle routing for municipal solid waste collection. *Networks*, 4: 65-94.
- Bianchessi, N., & Righini, G. 2007. Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. *Computers & Operations Research*, 34(2): 578-94.
- Blakeley, F., Arguello, B., Cao, B., Hall, W., & Knolmayer, J. 2003. Optimizing periodic maintenance operations for Schindler Elevator Corporation. *Interfaces*, 33(1): 67-79.
- Bodin, L., & Golden, B. 1981. Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11: 97-108.
- Bodin, L. D., & Sniezek, J. 2002. *Cost models for vehicle routing problems*. Paper presented at the Annual Hawaii International Conference on System Sciences.
- Bohm, R., Folz, D., Kinnaman, T., & Podolsky, M. 2010. The costs of municipal waste and recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling*, 54: 864-871.
- Blackburn, J. D., Guide, V. D. R. Jr., Souza, G. C., & Wassenhove, L. N. W. 2004. Reverse supply chains for commercial returns. *California Management Review*, 46(2): 6-22.
- Brandao, J. 2004. A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal Operations Research*, 157: 552-564.
- Carter, C. R., & Ellram, L. M. 1998. Reverse logistics: A review of the literature and framework for future investigation. *Journal of Business Logistics*, 19(1): 85-102.
- Carvalho, J. 2011. *Custos e benefícios, à escala local, de uma ocupação dispersa*. Universidade de Aveiro.

- Christofides, N. 1976. The vehicle routing problem. *Recherche Opérationnelle*, 10: 55–70.
- Christofides, N., & Beasley, J. 1984. The period routing problem. *Networks*, 14(2), 237-256.
- Christofides, N., & Eilon, S. 1969. An algorithm for the vehicle-dispatching problem. *Operational Research Quarterly*, 20: 309–318.
- Clark, R. M., & Gillean, J. I. 1975. Analysis of solid waste management operations in Cleveland, Ohio: A case study. *Interfaces*, 6(1): 32-42.
- Clarke, G., & Wright, J. W. 1964. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4): 568-581.
- Cordeau, J.F., Laporte, G., & Mercier, A. 1997. A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, 30(2): 105-119.
- Cordeau, J.F., Laporte, G., & Mercier, A. 2001. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 52(8): 928–936.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y., & Semet, F. 2002. A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53(5): 512-522.
- Crevier, B., Cordeau, J., & Laporte, G. 2007. The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European Journal of Operational Research*, 176(2): 756-773.
- Cruz, N. F., Simões, P., & Marques, R. C. 2012. Economic cost recovery in the recycling of packaging waste: The case of Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 37: 8-18.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. 1959. The truck dispatching problem stable. *Management Science*, 6(1): 80–91.
- De Brito, M.P., & Dekker, R. 2002. Reverse logistics: A framework. *Econometric Institute Report EI*, 2002–38.
- Den Boer, J., Den Boer, E., & Jager, J. 2007. LCA-IWM: A decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. *Waste Management*, 27(8): 1032-1045.
- Derigs, U., & Kaiser, R. 2007. Applying the attribute based hill climber heuristic to the vehicle routing problem. *European Journal of Operations Research*, 177(2): 719–732.
- Dubin, J. A., & Navarro, P. 1988. How markets for impure public goods organize the case of household refuse collection. *Journal of Law and Economics and Organization*, 4(2): 217-241.
- Eurostat – Tables, Graphs and Maps Interface (TGM). 2015. *Municipal waste generation and treatment, by type of treatment method*. Acedido a 29 de Setembro de 2015, obtido em <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdpc240&plugin=1>
- Fisher, M. L., & Jaikumar, R. 1981. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11(2): 109-124.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103: 1-17.

- Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. 2000. A characterization of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6): 653–66.
- Folz, D. H. 1995. The economics of municipal recycling: A preliminary analysis. *Public Administration Quarterly*, 19(3): 299-320.
- Ganeshan, R., Jack, E., Magazine, M. J., & Stephens, P. 1999. A taxonomic review of supply chain management research. In S. Tayur, R. Ganeshan & M. J. Magazine (Eds.), *Quantitative models for supply chain management*: 839-879. Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Glover, F. 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5): 533-549.
- Golden, B. L., & Wasil, E. A. 1987. OR Practice - Computerized Vehicle Routing in the Soft Drink Industry. *Operations Research*, 35(1): 6-17.
- Guide, V. D. R. Jr., & Van Wassenhove, L. N. 2002. The reverse supply chain. *Harvard Business Review*, 80(2): 25–26.
- Guide, V. D. R. Jr., & Van Wassenhove, L. N. 2003b. Special section on closed-loop supply chains. *Interfaces*, 33(6): 1–2.
- Gillett, B. E., & Miller, L. R. 1974. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations Research*, 22(2): 340-349.
- Gungor, A., & Gupta, S. M. 1998. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey. *Computers & Industrial Engineering*, 36: 811-853.
- Hadjiconstantinou, E., & Baldacci, R. 1998. A multi-depot period vehicle routing problem arising in the utilities sector. *Journal of the Operational Research Society*, 49(12): 1239-1248.
- Han, H., & Ponce-Cueto, E. 2015. Waste collection vehicle routing problem: Literature review. *Traffic & Transportation*, 27(4): 345-358.
- Hannan, M. A., Mamun, A. A., Hussain, A., Basri, H., & Begum, R. A. 2015. A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management systems: Issues and challenges. *Waste Management*, 43: 509-523.
- Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J. F., & Crainic, T. G. 2012. An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. *Computers and Operations Research*, 39(12): 3215–3228.
- Hinshaw, J. H., & Stearns, P. N. 2014. *Industrialization in the modern world: From the industrial revolution to the internet*. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO.
- Hillier, F. S., & Liberman, G. J. 2001. *Introduction to operations research* (7th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Ho, W., Ho, G. T. S., Ji, P., & Lau, H. C. W. 2008. A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(4): 548–557.
- Holland, J. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.
- Jozefowicz, N., Semet, F., & Talbi, E. 2008. Multi-objective vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 189: 293–309.

- Kannan, G., Palaniappan, M., Zhu, Q., & Kannan, D. 2012a. Analysis of third party reverse logistics provider using interpretive structural modeling. *International Journal of Production Economics*, 140(1): 204–211.
- Karadimas, N. V., Kolokathi, M., Defteraiou, G., & Loumos, V. 2007. *Municipal waste collection of large items optimized with arc GIS network analyst*. Paper presented at the 21st European Conference on Modelling and Simulation.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598): 671–680.
- Kumar, S., & Putnam, V. (2008). Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. *International Journal of Production Economics*, 115: 305–315.
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. A. 2012. A survey on the vehicle routing problem and its variants. *Intelligent Information Management*, 4: 66–74.
- Kulkarni, R. V., & Bhave, P. R. 1985. Integer programming formulations of vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 20(1): 58–67.
- Laporte, G. 2009. Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*. 43: 408–416.
- Laporte, G., Nobert, Y., & Arpin, D. 1984. Optimal solutions to capacitated multidepot vehicle routing problems. *Congressus Numerantium*, 44: 283–292.
- Laporte, G., Nobert, Y., & Taillefer, S. 1988. Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems. *Transportation Science*, 22(3): 161–172.
- Laporte, G., & Semet, F. 2002. Classical heuristics for the capacitated VRP. In P. Toth, & D. Vigo (Eds.), *The vehicle routing problem. SIAM monographs on discrete mathematics and applications*, 9: 109–128. Philadelphia: SIAM.
- Letchford, A. N., Lysgaard, J., & Eglese, R. W. 2006. A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 58(12): 1642–1651.
- Levy, L. 2005. *Private communication*. RouteSmart Technologies, Inc.
- Li, F. Y., Golden, B., & Wasil, E. 2007. The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results. *Computers and Operational Research*, 34(10): 2918–2930.
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. 2014. Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41: 1118–1138.
- Liu, R., & Jiang, Z. 2012. The close–open mixed vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 220: 349–360.
- Liu, F. H., & Shen, S. Y. 1999. Fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 50: 721–732.
- Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. 2014. *Vehicle routing for a complex waste collection problem*. Paper presented at the 14th Swiss Transport Research Conference.
- Montoya-Torres, J. R. 2014. *Designing sustainable supply chains based on the triple bottom line approach*. Paper presented at the International Conference on Advanced Logistics and Transport, França.

- Montoya-Torres, J. R., Muñoz-Villamizar, S., & Vega-Mejía, C. A. 2016. On the impact of collaborative strategies for goods delivery in city logistics. *Production Planning & Control*, 27(6): 443-455.
- Montoya-Torres, J. R. 2015. *Designing sustainable supply chains based on the triple bottom line approach*. Paper present at the International Conference on Advanced logistics and Transport, Chia, Columbia.
- Montoya-Torres, J. R., Lopez France, J., Nieto Isaza, S., Felizzola Jimenez, H., & Herazo-Padilla, N. 2015. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, 79: 115–129.
- Murphy, P. R., & Poist, R. P. 1989. Managing of logistics retro movements: An empirical analysis of literature suggestions. *Transportation Research Forum*, 29(1): 177–84.
- Muttiah, R. S., Engel, B. A., & Jones, D. D. 1996. Waste disposal site selection using GIS-based simulated annealing. *Computers & Geosciences*, 22(9): 1013-1017.
- Or, I., & Curi, K. 1993. Improving the efficiency of the solid waste collection system in Izmir, Turkey through mathematical programming. *Waste Management & Research*, 11: 297-311.
- PERSU 2020. 2014. *Persu 2020 – Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos*. Acedido a 15 de Outubro de 2015, obtido em: [http://www.apambiente.pt/zdata/DESTAQUES/2014/Portaria PlanoEstrategico PERSU2020\\_final.pdf](http://www.apambiente.pt/zdata/DESTAQUES/2014/Portaria_PlanoEstrategico_PERSU2020_final.pdf)
- Prahinski, C., & Kocabasoglu, C. 2006. Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega*, 34(6): 519–32.
- Ramos, T. P. R., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. 2013. Planning waste cooking oil collection systems. *Waste Management*, 33(8): 1691-1703.
- Renaud, J., Laporte, G., & Boctor, F. F. 1996. A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 23(3): 229–235.
- Russell, R. A., & Igo, W. 1979. An assignment routing problem. *Networks*, 9(1): 1-17.
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. 1999. *Going backwards: Reverse logistics trends and practices*. Pittsburgh, PA: RLEC Press.
- Sahoo, S., Kim, S., Kim, B. I. Kraas, B., & Popov Jr., A. 2005. Routing optimization for waste management. *Interfaces*, 35(1): 24-36.
- Schrage, L. 1981. Formulation and structure of more complex-realistic routing and scheduling problems. *Networks*, 11: 229–232.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. 2008. *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and case studies*. Boston: McGraw-Hill Irwin.
- Solomon, M. M. 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2): 254-265.
- SPV. 2016. *O Sistema Ponto Verde*. Acedido a 26 de Outubro de 2015, obtido em: [http://www.pontoverde.pt/como funciona.php](http://www.pontoverde.pt/como_funciona.php)
- Stock, J. R. 1992. *Reverse Logistics*. Oak Brook, IL: Council of Logistics Management.
- Stock, J. R., & Mulki, J. P. 2009. Product returns processing: an examination of practices of manufacturers wholesalers/distributors and retailers. *Journal of Business Logistics*,

30(1): 33-62.

Teixeira, J., Antunes, A. P., & de Sousa, J. P. 2004. Recyclable waste collection planning: A case study. *European Journal of Operational Research*, 158(3): 543-554.

Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. 1995. Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37(2): 114-35.

Tin, A. M., Wise, D. L., Su, W. H., Reutergardh, L., & Lee, S. K. 1995. Cost-benefit analysis of the municipal solid waste collection system in Yangon, Myanmar. *Resources, Conservation and Recycling*, 14: 103-131.

Tüzün, D., & Burke, L. 1999. A two-phase tabu search approach to the location routing problem. *European Journal of Operational Research*, 116(1): 87-99.

UNEP. 2013. *Guidelines for National Waste Management Strategies*. United Nations Environment Programme.

Valorsul. 2016. *Sistema de informação geográfica da Valorsul*. Acedido a 18 de Outubro de 2015, obtido em: <http://www.valorsul.pt/pt/sig.aspx>



## Anexos

### Anexo 1 - Numero de ecopontos por freguesia

| Concelho | Freguesia                           | Código Freguesia | Contagem de CodEcoponto |
|----------|-------------------------------------|------------------|-------------------------|
| Alcobaça | Alcobaça                            | 1                | 37                      |
| Alcobaça | Alfeizerão                          | 2                | 23                      |
| Alcobaça | Aljubarrota (Prazeres)              | 3                | 19                      |
| Alcobaça | Aljubarrota (São Vicente)           | 4                | 12                      |
| Alcobaça | Alpedriz                            | 5                | 7                       |
| Alcobaça | Bárrio                              | 6                | 9                       |
| Alcobaça | Benedita                            | 7                | 33                      |
| Alcobaça | Cela                                | 8                | 14                      |
| Alcobaça | Coz                                 | 9                | 11                      |
| Alcobaça | Évora de Alcobaça                   | 10               | 17                      |
| Alcobaça | Maiorga                             | 11               | 12                      |
| Alcobaça | Martingança                         | 12               | 7                       |
| Alcobaça | Montes                              | 13               | 4                       |
| Alcobaça | Pataias                             | 14               | 30                      |
| Alcobaça | São Martinho do Porto               | 15               | 26                      |
| Alcobaça | Turquel                             | 16               | 17                      |
| Alcobaça | Vestiaria                           | 17               | 9                       |
| Alcobaça | Vimeiro                             | 18               | 11                      |
| Alenquer | Abrigada                            | 19               | 17                      |
| Alenquer | Aldeia Galega da Merceana           | 20               | 12                      |
| Alenquer | Aldeia Gavinha                      | 21               | 4                       |
| Alenquer | Cabanas de Torres                   | 22               | 4                       |
| Alenquer | Cadafais                            | 23               | 10                      |
| Alenquer | Carnota                             | 24               | 5                       |
| Alenquer | Carregado                           | 25               | 53                      |
| Alenquer | Meca                                | 26               | 6                       |
| Alenquer | Olhalvo                             | 27               | 8                       |
| Alenquer | Ota                                 | 28               | 10                      |
| Alenquer | Pereiro de Palhacana                | 29               | 2                       |
| Alenquer | Ribafria                            | 30               | 3                       |
| Alenquer | Santo Estevão                       | 31               | 35                      |
| Alenquer | Triana                              | 32               | 29                      |
| Alenquer | Ventosa                             | 33               | 9                       |
| Alenquer | Vila Verde dos Francos              | 34               | 5                       |
|          | Arruda dos Vin  Arranhó             | 35               | 14                      |
|          | Arruda dos Vin  Arruda dos Vinhos   | 36               | 39                      |
|          | Arruda dos Vin  Cardosas            | 37               | 2                       |
|          | Arruda dos Vin  Santiago dos Velhos | 38               | 7                       |
| Azambuja | Alcoentre                           | 39               | 16                      |
| Azambuja | Aveiras de Baixo                    | 40               | 7                       |
| Azambuja | Aveiras de Cima                     | 41               | 23                      |
| Azambuja | Azambuja                            | 42               | 34                      |
| Azambuja | Maçussa                             | 43               | 4                       |
| Azambuja | Manique do Intendente               | 44               | 10                      |
| Azambuja | Vale do Paraíso                     | 45               | 3                       |
| Azambuja | Vila Nova da Rainha                 | 46               | 6                       |
| Azambuja | Vila Nova de São Pedro              | 47               | 5                       |

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

|                  |                         |     |    |
|------------------|-------------------------|-----|----|
| Bombarral        | Bombarral               | 48  | 36 |
| Bombarral        | Carvalhal               | 49  | 14 |
| Bombarral        | Pó                      | 50  | 4  |
| Bombarral        | Roliça                  | 51  | 19 |
| Bombarral        | Vale Covo               | 52  | 6  |
| Cadaval          | Alguber                 | 53  | 3  |
| Cadaval          | Cadaval                 | 54  | 27 |
| Cadaval          | Cercal                  | 55  | 3  |
| Cadaval          | Figueiros               | 56  | 4  |
| Cadaval          | Lamas                   | 57  | 16 |
| Cadaval          | Painho                  | 58  | 6  |
| Cadaval          | Peral                   | 59  | 7  |
| Cadaval          | Pêro Moniz              | 60  | 4  |
| Cadaval          | Vermelha                | 61  | 10 |
| Cadaval          | Vilar                   | 62  | 11 |
| Caldas da Rainha | A dos Francos           | 63  | 12 |
| Caldas da Rainha | Alvorninha              | 64  | 12 |
| Caldas da Rainha | Carvalhal Benfeito      | 65  | 9  |
| Caldas da Rainha | Coto                    | 66  | 9  |
| Caldas da Rainha | Foz do Arelho           | 67  | 13 |
| Caldas da Rainha | Landal                  | 68  | 8  |
| Caldas da Rainha | Nadadouro               | 69  | 11 |
| Caldas da Rainha | Nossa Senhora do Pópulo | 70  | 74 |
| Caldas da Rainha | Salir de Matos          | 71  | 14 |
| Caldas da Rainha | Salir do Porto          | 72  | 9  |
| Caldas da Rainha | Santa Catarina          | 73  | 13 |
| Caldas da Rainha | Santo Onofre            | 74  | 49 |
| Caldas da Rainha | São Gregório            | 75  | 6  |
| Caldas da Rainha | Serra do Bouro          | 76  | 4  |
| Caldas da Rainha | Tornada                 | 77  | 22 |
| Caldas da Rainha | Vidais                  | 78  | 9  |
| Lourinhã         | Atalaia                 | 79  | 14 |
| Lourinhã         | Lourinhã                | 80  | 75 |
| Lourinhã         | Marteleira              | 81  | 10 |
| Lourinhã         | Miragaia                | 82  | 11 |
| Lourinhã         | Moita dos Ferreiros     | 83  | 12 |
| Lourinhã         | Moledo                  | 84  | 2  |
| Lourinhã         | Reguengo Grande         | 85  | 7  |
| Lourinhã         | Ribamar                 | 86  | 12 |
| Lourinhã         | Santa Bárbara           | 87  | 12 |
| Lourinhã         | São Bartolomeu Galegos  | 88  | 7  |
| Lourinhã         | Vimeiro                 | 89  | 10 |
| Nazaré           | Famalicão               | 90  | 13 |
| Nazaré           | Nazaré                  | 91  | 47 |
| Nazaré           | Valado dos Frades       | 92  | 16 |
| Óbidos           | Amoreira                | 93  | 1  |
| Peniche          | Ajuda                   | 96  | 67 |
| Peniche          | Atouguia da Baleia      | 97  | 60 |
| Peniche          | Conceição               | 98  | 23 |
| Peniche          | Ferrel                  | 99  | 22 |
| Peniche          | São Pedro               | 100 | 15 |
| Peniche          | Serra D'El Rei          | 101 | 12 |

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

|                        |                          |     |    |
|------------------------|--------------------------|-----|----|
| Rio Maior              | Alcobertas               | 102 | 7  |
| Rio Maior              | Arrouquelas              | 103 | 4  |
| Rio Maior              | Arruda dos Pisões        | 104 | 2  |
| Rio Maior              | Asseiceira               | 105 | 4  |
| Rio Maior              | Assentiz                 | 106 | 3  |
| Rio Maior              | Azambujeira              | 107 | 2  |
| Rio Maior              | Fráguas                  | 108 | 5  |
| Rio Maior              | Malaqueijo               | 109 | 3  |
| Rio Maior              | Marmeleira               | 110 | 4  |
| Rio Maior              | Outeiro da Cortiçada     | 111 | 3  |
| Rio Maior              | Ribeira de São João      | 112 | 1  |
| Rio Maior              | Rio Maior                | 113 | 65 |
| Rio Maior              | São João da Ribeira      | 114 | 4  |
| Rio Maior              | São Sebastião            | 115 | 2  |
| Sobral de Monte Agraço | São Quintino             | 116 | 13 |
| Sobral de Monte Agraço | Sapataria                | 117 | 10 |
| Sobral de Monte Agraço | Sobral de Monte Agraço   | 118 | 26 |
| Torres Vedras          | A dos Cunhados           | 119 | 62 |
| Torres Vedras          | Campelos                 | 120 | 14 |
| Torres Vedras          | Carmões                  | 121 | 4  |
| Torres Vedras          | Carvoeira                | 122 | 10 |
| Torres Vedras          | Dois Portos              | 123 | 8  |
| Torres Vedras          | Freiria                  | 124 | 9  |
| Torres Vedras          | Maceira                  | 125 | 10 |
| Torres Vedras          | Matacães                 | 126 | 4  |
| Torres Vedras          | Maxial                   | 127 | 18 |
| Torres Vedras          | Monte Redondo            | 128 | 3  |
| Torres Vedras          | Outeiro da Cabeça        | 129 | 8  |
| Torres Vedras          | Ponte do Rol             | 130 | 11 |
| Torres Vedras          | Ramalhal                 | 131 | 22 |
| Torres Vedras          | Runa                     | 132 | 6  |
| Torres Vedras          | Santa Maria e São Miguel | 133 | 35 |
| Torres Vedras          | São Pedro da Cadeira     | 134 | 24 |
| Torres Vedras          | São Pedro e São Tiago    | 135 | 74 |
| Torres Vedras          | Silveira                 | 136 | 48 |
| Torres Vedras          | Turcifal                 | 137 | 21 |
| Torres Vedras          | Ventosa                  | 138 | 19 |

Tabela 34 - Número de contentores alocados a cada freguesia.

### Anexo 2 - Áreas de intervenção

| Depósito | Número de freguesias |            | % de freguesias alocadas ao depósito |            |
|----------|----------------------|------------|--------------------------------------|------------|
|          | Cenário I            | Cenário II | Cenário I                            | Cenário II |
| A        | 6                    | 9          | 3%                                   | 5%         |
| B        | 12                   | 18         | 6%                                   | 9%         |
| C        | 33                   | 28         | 16%                                  | 14%        |
| D        | 45                   | 12         | 22%                                  | 6%         |
| E        | 2                    | 20         | 1%                                   | 10%        |
| F        | 7                    | 11         | 3%                                   | 6%         |
| G        | 98                   | 96         | 48%                                  | 49%        |

Tabela 35 - Área de intervenção de cada depósito.

## RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE RECOLHA DE RESÍDUOS

### Anexo 3 – Rotas a efetuar no cenário I

| Rotas                               |   |   |  |
|-------------------------------------|---|---|--|
| 7 Dias                              | 14 Dias   | 21 Dias                                     | 28 Dias  |
| Alenquer-41-45-40-42-46-28-Alenquer | CTRO-34-33-27-19-26-23-37-38-35-117-CTRO                  | Rio Maior-64-56-55-47-107-110-112-Rio Maior | Rio Maior-115-108-111-104-106-43-53-Rio Maior        |
| Nazaré-14-91-Nazaré                 | Rio Maior-4-13-5-12-9-11-17-92-90-Óbidos                  | CTRO-129-128-24-30-21-CTRO                  | Sobral de Monte Agraço-121-29-Sobral de Monte Agraço |
| Óbidos-70-127-131-CTRO              | CTRO-78-75-60-61-59-58-63-68-105-103-44-109-114-Rio Maior |   |  |
| Óbidos-74-67-101-54-CTRO            | Óbidos-66-71-77-76-69-93-88-84-85-50-51-CTRO              |   |  |
| Rio Maior-102-7-16-10-3-Nazaré      | CTRO-122-123-124-52-49-8-18-73-Óbidos                     |   |  |
| CTRO-31-36-116-CTRO                 |   |   |  |
| CTRO-62-57-39-113-Rio Maior         |   |   |  |
| CTRO-133-135-CTRO                   |   |   |  |
| CTRO-87-86-79-80-CTRO               |   |   |  |
| CTRO-130-138-134-136-CTRO           |   |   |  |
| Peniche-97-89-125-81-CTRO           |   |   |  |
| Peniche-100-96-99-Peniche           |   |   |  |
| CTRO-83-82-118-137-132-126-20-CTRO  |   |   |  |
| Nazaré-1-6-15-72-65-Óbidos          |   |   |  |
| Óbidos-2-119-120-CTRO               |   |   |  |

Tabela 36 - Rotas a efetuar no cenário I nas diferentes frequências.

### Anexo 4 – Rotas a efetuar no cenário II

| Rotas                                 |  |   |   |
|---------------------------------------|--|---|---|
| 7 Dias                                | 14 Dias  | 21 Dias                                     | 28 Dias                                       |
| Alenquer-42-45-41-118-Alenquer        | Nazaré-14-12-5-13-11-17-91-Nazaré                          | CTRO-49-56-63-75-78-64-71-66-Óbidos         | CTRO-43-106-104-111-108-115-68-53-29-121-CTRO |
| Óbidos-70-7-Óbidos                    | Nazaré-88-61-72-52-60-CTRO                                 | CTRO-129-127-128-116-35-24-30-21-26-57-CTRO |   |
| Óbidos-74-67-6-Óbidos                 | Óbidos-76-2-15-69-73-62-Óbidos                             | Rio Maior-102-112-110-107-47-44-55-59-CTRO  |   |
| Peniche-100-98-96-Peniche             | Sobral de Monte Agraço-114-123-132-134-124-122-117-20-CTRO | Óbidos-65-18-8-90-9-4-Nazaré                |   |
| Alenquer-31-32-22-CTRO                | Peniche-93-99-92-97-Peniche                                |   |   |
| CTRO-119-136-CTRO                     | CTRO-34-33-27-19-28-40-41-23-37-38-Sobral de Monte Agraço  |   |   |
| CTRO-120-80-CTRO                      | CTRO-58-51-50-46-84-83-87-77-85-79-81-82-CTRO              |   |   |
| CTRO-131-135-CTRO                     | CTRO-39-103-101-109-105-3-10-16-CTRO                       |   |   |
| Rio Maior-113-89-86-125-Peniche       |  |   |   |
| Sobral de Monte Agraço-36-25-Alenquer |  |   |   |
| CTRO-130-138-133-126-CTRO             |  |   |   |
| Óbidos-1-48-54-CTRO                   |  |   |   |

Tabela 37 - Rotas a efetuar no cenário II nas diferentes frequências.