



Definição de Circuitos num Sistema de Resíduos Sólidos Urbanos

Integração da Recolha de Resíduos Orgânicos no Sistema de
Lisboa

José Inácio da Cunha de Castello Branco

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Prof. Rui Manuel Moura de Carvalho Oliveira

Júri

Presidente: Prof. Carlos António Bana e Costa

Orientador: Prof. Rui Manuel Moura de Carvalho Oliveira

Vogal: Prof.^a Tânia Rodrigues Pereira Ramos

Novembro 2019

Resumo

Atualmente, pelo menos 33% dos resíduos urbanos gerados mundialmente ainda são depositados em aterros ou queimados, levando à libertação de metano resultante da decomposição de resíduos orgânicos, que contribui para o aquecimento global (Kaza *et al.*, 2018). Neste sentido, a União Europeia lançou uma campanha que responsabiliza Lisboa pela recolha de 4000 toneladas de resíduos orgânicos no sector doméstico.

A presente dissertação tem como objetivo integrar e otimizar a recolha de resíduos orgânicos no sector doméstico ao Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) da cidade de Lisboa. É-nos dado um conjunto de pontos de recolha numa zona de estudo onde instalar o novo fluxo de resíduos, ao qual as operações de recolha atuais devem ser atribuídas e as rotas dos veículos devem ser desenhadas. Serão estudadas diversas modificações na zona de estudo para acomodar o novo fluxo, tendo em consideração duas preocupações principais: uma de carácter organizacional relacionada com a simplicidade com a qual a solução deve ser implementada, outra de carácter económico ligada aos custos adicionais das modificações.

A metodologia desenvolvida lida com vários aspetos do problema e inclui a análise de três cenários de integração e um modelo que combina diversos procedimentos heurísticos do VRP para configurar rotas. Devido aos vários aspetos a ter em conta em cada cenário, o modelo desenvolvido deve ser flexível o suficiente para lidar com todos eles e otimizar a distância e o tempo. Por fim, os três cenários foram comparados e foi obtida uma solução admissível para cada um deles.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Resíduos; Recolha de Resíduos; Resíduos Orgânicos; Problema de Planeamento de Rotas de Veículos.

Abstract

Currently, at least 33% of Municipal Solid Waste (MSW) generated worldwide is still burned or dumped in landfills, leading to the release of methane resulting from the decomposition of organic waste, which contributes to global warming (Kaza et al., 2018). In order to improve the situation and build sustainable cities the European Union has launched a campaign that accounted Lisbon for the collection of 4000 tonnes of organic waste in the domestic sector.

This dissertation aims to incorporate and optimize domestic organic waste collection into the Municipal Solid Waste Management System (MSWMS) of Lisbon. A set of collection points in a study zone to introduce the new waste flow is given, to which current collection operations have to be assigned and vehicles routes have to be designed. To do so, several modifications in the MSWMS have to be applied, so that the problem takes into account two main concerns: one of organizational character related with the simplicity with which the solution is to be implemented, other of economic character linked to the resulting additional costs.

The developed methodology deals with several aspects of the problem and includes three integration scenarios and a model combining VRP heuristic procedures to route the vehicles. Due to multiple aspects in each scenario, the model developed must be flexible enough to cope with all of them while optimising distance and time. In the end, a comparison between scenarios was performed and feasible solutions were obtained for each one of them.

KEYWORDS: Waste Management; Waste Collection; Organic Waste; Vehicle Routing Problem.

Agradecimentos

Ao longo de todos estes meses de trabalho intensivo dedicado ao estudo do Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos de Lisboa e da problemática da integração da recolha de resíduos orgânicos nesse mesmo sistema, foram muitas as pessoas que contribuíram, de uma forma ou de outra, para que o mesmo se realizasse. Desta forma, não queria deixar de agradecer:

Ao Professor Rui Oliveira, orientador deste trabalho, pela sua disponibilidade e apoio ao longo de toda a sua execução. As suas reflexões e críticas foram imprescindíveis para ultrapassar todas as dificuldades encontradas;

À Magda Matias pela disponibilidade e interesse no projeto, pela companhia, e pela contribuição com os seus conhecimentos em Sistemas de Informação Geográfica, que também foram essenciais no desenvolvimento do trabalho. E aos restantes colegas de gabinete, pela companhia, cooperação e boa disposição;

À Câmara Municipal de Lisboa (CML), em especial à Vanessa Fonseca, à Luísa Coelho e ao Manuel Severino, pelo apoio e pelas informações de base concedidas sem as quais teria sido impossível chegar à conclusão deste trabalho;

A todos os colegas que acompanharam o meu percurso académico dando-me motivação, apoio e força anímica, em especial ao Henrique Câmara, João Moreno e Frederico Monteiro. Grandes parceiros e companheiros nesta última e mais difícil fase do trabalho e que, de uma maneira ou de outra, contribuíram com as suas ideias e experiência para a execução do trabalho;

Aos meus grandes amigos Tomás Farias, José Maria Álvares e Matilde Valido, pelo seu apoio, pela sua amizade e paciência e ainda pelo interesse demonstrado ao longo deste processo. Mais uma vez, as nossas reflexões frutíferas contribuíram de uma maneira ou de outra para o desenvolvimento do trabalho;

E finalmente, agradeço à minha família o apoio, encorajamento e compreensão em momentos mais tensos e críticos. Sem a sua força, não teria sido capaz de concluir o trabalho.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Resumo | I |
| Abstract | II |
| Agradecimentos | III |
| Índice | IV |
| Lista de Figuras | VI |
| Lista de Tabelas..... | VII |
| Lista de Acrónimos | VIII |
| Capítulo 1 – Introdução | 1 |
| 1.1 Contextualização e Motivação | 1 |
| 1.2 Objetivos da Dissertação | 1 |
| 1.3 Metodologia..... | 2 |
| 1.4 Estrutura da Dissertação | 3 |
| Capítulo 2 – Caracterização do Problema | 4 |
| 2.1 Gestão de Resíduos | 5 |
| 2.2 Enquadramento e Estratégia para os Resíduos em Lisboa | 6 |
| 2.3 Resíduos Orgânicos..... | 8 |
| 2.3.1 Caracterização dos Resíduos Indiferenciados | 8 |
| 2.3.2 Valorização Orgânica | 9 |
| 2.4 O Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos de Lisboa | 10 |
| 2.4.1 Equipamento de Remoção | 10 |
| 2.4.2 Infraestruturas..... | 11 |
| 2.4.3 Operações | 11 |
| 2.5 Definição do Problema..... | 13 |
| Capítulo 3 – Revisão da Literatura | 15 |
| 3.1 Recolha de Resíduos..... | 16 |
| 3.2 Vehicle Routing Problem | 18 |
| 3.3 Técnicas de Resolução do VRP | 20 |
| 3.3.1 Métodos Exatos | 20 |
| 3.3.2 Heurísticas Clássicas | 21 |
| 3.3.3 Metaheurísticas | 23 |
| 3.4 Variantes do VRP..... | 26 |
| 3.4.1 PVRP | 26 |
| 3.4.2 VRPTW | 29 |
| Capítulo 4 – Método de Abordagem e Modelos Utilizados | 31 |
| 4.1 Considerações Gerais | 31 |
| 4.2 Cenários de Análise | 32 |
| 4.3 Objetivos e Restrições | 35 |
| 4.4 Abordagem ao Problema | 37 |
| 4.5 O Algoritmo Proposto..... | 38 |
| 4.5.1 Módulos de Construção de Circuitos | 39 |
| 4.5.2 Módulo Fusão | 44 |
| 4.5.3 Módulos dos Circuitos Orgânicos..... | 46 |
| 4.5.4 Procedimentos Finais | 50 |
| Capítulo 5 – Tratamento de Dados | 51 |
| 5.1 Pontos de Recolha..... | 51 |
| 5.1.1 Circuitos | 52 |
| 5.1.2 Localização..... | 53 |
| 5.1.3 Capacidade..... | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1.4 Habitantes Servidos | 55 |
| 5.1.5 Produção de Resíduos | 56 |
| 5.2 Distâncias..... | 58 |
| 5.3 Veículos de Recolha | 59 |
| 5.3.1 Capacidade Máxima..... | 59 |
| 5.3.2 Velocidade Média | 61 |
| 5.3.3 Duração Máxima..... | 61 |
| Capítulo 6 – Aplicação ao Caso de Estudo | 62 |
| 6.1 Resolução do Cenário A – Reconfiguração de Circuitos..... | 62 |
| 6.1.1 Reconfiguração dos Circuitos..... | 62 |
| 6.1.2 Resultados Obtidos para o Cenário A | 63 |
| 6.2 Resolução do Cenário B – Circuitos Mistos | 65 |
| 6.2.1 Repartição e Reconfiguração de Circuitos..... | 65 |
| 6.2.2 Resultados Obtidos para o Cenário B..... | 66 |
| 6.3 Resolução do Cenário C – Circuitos Orgânicos em Entidades | 67 |
| 6.3.1 Alocação do Projeto Piloto | 68 |
| 6.3.2 Resultados Obtidos para o Cenário C..... | 69 |
| 6.4 Resolução Cenário de Controlo..... | 70 |
| 6.5 Confrontação Final dos Cenários | 71 |
| Capítulo 7 – Conclusões e Trabalho Futuro | 73 |
| 7.1 Síntese e Conclusões | 73 |
| 7.2 Trabalho Futuro..... | 74 |
| Bibliografia..... | 75 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Composição física dos indiferenciados na área de intervenção da Valorsul (2014).... | 9 |
| Figura 2 - Calendário Semanal da Operação PaP de Recolha Seletiva no Sector Doméstico.. | 13 |
| Figura 3 - Ilustração do VRP | 18 |
| Figura 4 - Representação dos Cenários de Análise | 33 |
| Figura 5 - Esquema simplificado do Módulo Construção | 40 |
| Figura 6 - Ilustração do critério de proximidade (a) e critério de poupança (b) | 41 |
| Figura 7 - Ilustração da segunda etapa com a utilização dos dois critérios de seleção | 42 |
| Figura 8 - Ilustração da terceira e quarta etapa do Módulo Metamorfose | 42 |
| Figura 9 - Esquema do Módulo Metamorfose..... | 43 |
| Figura 10 - Ilustração da primeira etapa do Módulo Fusão | 44 |
| Figura 11 - Ilustração da segunda etapa do Módulo Fusão | 44 |
| Figura 12 - Esquema do Módulo Fusão..... | 45 |
| Figura 13 - Esquema simplificado do Módulo Avaliação | 48 |
| Figura 14 - Esquema simplificado do Módulo Alocação | 49 |
| Figura 15 - Esquema dos procedimentos utilizados para a resolução dos três cenários..... | 50 |
| Figura 16 - Esquema da estruturação dos pontos de recolha | 52 |
| Figura 17 - Localização dos Pontos de Recolha organizados por circuito | 54 |
| Figura 19 - Cálculo da capacidade..... | 54 |
| Figura 18 - Capacidade dos Pontos de Recolha | 55 |
| Figura 20 - Habitantes Servidos por Ponto de Recolha..... | 56 |
| Figura 21 – Distribuição das capacidades máximas de orgânicos (2018) | 60 |
| Figura 22 - Reconfiguração dos circuitos no Cenário A | 63 |
| Figura 23 - Mapa das rotas calculadas para o Cenário A..... | 64 |
| Figura 24 - Repartição dos circuitos para o Cenário B | 66 |
| Figura 25 - Mapa das rotas calculadas para o Cenário B..... | 67 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Objetivos do PERSU 2020..... | 7 |
| Tabela 2 - Estratégia de Acção do Município de Lisboa..... | 7 |
| Tabela 3 - Contentores (2014) | 11 |
| Tabela 4 - Frota de remoção (2014) | 11 |
| Tabela 5 - Circuitos de PaP Seletiva no Sector Doméstico afetados | 33 |
| Tabela 6 - Identificação e caracterização dos circuitos | 53 |
| Tabela 7 - Capacidade máxima do veículo por tipo de resíduo..... | 60 |
| Tabela 8 - Velocidades médias por tipo de operação..... | 61 |
| Tabela 9 - Tempos de realização das rotas obtidas para o Cenário A em horas..... | 63 |
| Tabela 10 - Distâncias percorridas para o Cenário A em metros | 64 |
| Tabela 11 - Tempos de realização das rotas obtidas para o Cenário B em horas..... | 66 |
| Tabela 12 - Distâncias percorridas para o Cenário B em metros | 66 |
| Tabela 13 - Alocação de pontos de recolha do projeto piloto aos circuitos de orgânicos | 68 |
| Tabela 14 - Tempos de realização das rotas dos circuitos para o Cenário C em horas | 69 |
| Tabela 15 - Distâncias percorridas para as rotas do Cenário C em metros | 69 |
| Tabela 16 - Tempos de realização das rotas dos circuitos originais em horas | 70 |
| Tabela 17 - Distâncias percorridas das rotas dos circuitos originais em metros | 70 |
| Tabela 18 - Comparação entre os resultados obtidos e os dados de 2018 da CML..... | 71 |
| Tabela 19 - Comparação de Cenários | 71 |
| Tabela 20 - Resumo da análise dos cenários quanto ao fator organizacional | 72 |

Lista de Acrónimos

- ACO** - *Ant Colony Optimization* ou Otimização por Colónias de Formigas
- ALNS** – *Adaptive Large Neighbourhood Search* ou Pesquisa de Vizinhança Adaptiva Alargada
- APA** – Agência Portuguesa do Ambiente
- CML** – Câmara Municipal de Lisboa
- CTRSU** – Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos
- DHU** – Departamento de Higiene Urbana
- DMHU** – Direção Municipal de Higiene Urbana
- ETVO** – Estação de Tratamento e Valorização Orgânica
- FORCE** – *For Circular Economy*
- GA** – *Genetic Algorithms* ou Algoritmos Genético
- GAP** – *Generalised Assignment Problem*
- GRASP** – Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
- IO** – Investigação Operacional
- MDVRP** – *Multi-Depot Vehicle Routing Problem*
- NS** – *Neighbourhood Search* ou Pesquisa de Vizinhança
- OE2** – Objetivo Estratégico 2
- OS4** – Objetivo de Suporte 4
- PaP** – Operação Porta-à-Porta
- PERSU** – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos
- PMGR** – Plano Municipal de Gestão de Resíduos
- PNGR** – Plano Nacional de Gestão de Resíduos
- PP** – Projeto Piloto
- PR** – Ponto de Recolha
- PVRP** – *Periodic Vehicle Routing Problem*
- RO** – Resíduos Orgânicos
- RSU** – Resíduos Sólidos Urbanos
- RUB** – Resíduos Urbanos Biodegradáveis
- SA** – *Simulated Annealing* ou Arrefecimento Simulado
- SGRU** – Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos
- TS** – *Tabu Search* ou Pesquisa Tabu
- TSP** – *Travelling Salesman Problem*
- VLNS** – *Variable Large Neighbourhood Search* ou Pesquisa de Vizinhança Variável Alargada
- VNS** – *Variable Neighbourhood Search* ou Pesquisa de Vizinhança Variável
- VRP** – *Vehicle Routing Problem* ou Problema de Rotas de Veículos
- VRPTW** – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

Em 2016 foram gerados cerca de 2 mil milhões de toneladas de resíduos urbanos a nível mundial. Devido à má gestão dos mesmos, contribuem para o aquecimento global com a geração de gases de efeito estufa no equivalente a cerca de 1.6 mil milhões de toneladas de dióxido de carbono. Atualmente, pelo menos 33% ainda são depositados em aterros ou queimados. O principal responsável por esta contribuição é a libertação de metano resultante da decomposição de resíduos orgânicos (Kaza *et al.*, 2018).

Para que seja possível construir cidades sustentáveis, o estudo da disciplina de Gestão de Resíduos é fulcral. Esta é uma atividade multidisciplinar que inclui uma série de decisões estratégicas, táticas e operacionais e um grande número de atividades. Com o aumento da população, veículos limitados e aumento do trânsito, a componente de recolha e transporte de resíduos é uma tarefa cada vez mais complexa e dispendiosa.

Esforços para formalizar a gestão dos resíduos podem reduzir significativamente a emissão de gases de efeito estufa. Desta forma, a União Europeia tem lançado diversas campanhas com esse objetivo e Lisboa estabeleceu metas à luz dos quais ficou responsável por recolher e tratar mais 7000 toneladas anuais de resíduos orgânicos, dos quais 4000 no sector doméstico.

Dos riscos ambientais causados pelos resíduos orgânicos, da complexidade da recolha e transporte de resíduos e no âmbito da campanha europeia para a cidade de Lisboa nasce este estudo, que se enquadra no objetivo de acrescentar a recolha seletiva de 4000 toneladas de resíduos orgânicos no sector doméstico ao sistema de recolha em vigor na cidade de Lisboa, de forma organizacionalmente simples e minimizando custos adicionais.

1.2 Objetivos da Dissertação

De acordo com o contexto do problema, os principais objetivos que se pretendem atingir na realização da dissertação são os seguintes:

- Caracterização do problema e do caso de estudo;
- Revisão dos principais modelos e métodos utilizados na resolução de problemas semelhantes ao problema em estudo;
- Conceção de uma metodologia para a incorporação da recolha seletiva de resíduos orgânicos no Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos de Lisboa tendo em conta as restrições inerentes às atividades do sistema, com ensaio da mesma para a zona de estudo;

- Encontrar uma solução viável tendo em conta os fatores organizacional – simplicidade de implementação da solução encontrada – e económico – diminuição dos custos adicionais resultantes da implementação da solução para a zona de estudo;
- Criar e implementar, em linguagem de programação R, um algoritmo para a configuração de rotas, baseado em métodos heurísticos;
- Determinar a configuração ótima das rotas para cada um dos cenários de análise desenvolvidos, oferecendo opções de decisão viáveis para a zona de estudo;
- Avaliação das soluções encontradas para o apoio à decisão no lançamento do projeto piloto para a recolha de resíduos orgânicos no sector doméstico em Lisboa.

1.3 Metodologia

A metodologia adotada para realização da presente dissertação pode ser definida em cinco etapas essenciais:

1. Caracterização do problema em estudo – nesta primeira etapa pretende-se enquadrar o problema, definir os conceitos necessários à sua compreensão e caracterizar o sistema e as operações que serão alvo do estudo. O objetivo primordial é a definição do problema e o seu âmbito.

2. Revisão da literatura – será elaborada uma revisão da literatura de acordo com o problema caracterizado na etapa anterior. A revisão aborda tópicos de Gestão de Resíduos, modelos de otimização de rotas e técnicas de resolução. São referidas algumas aplicações de modelos a casos reais. O principal objetivo desta etapa é a pesquisa e sistematização das diferentes abordagens já existentes na literatura, de forma a aplica-las ao problema em estudo.

3. Abordagem para a resolução do problema – desenvolvimento de um método de abordagem a utilizar na resolução do caso de estudo com base na caracterização do problema e na literatura revista. Na abordagem utilizada o problema é dividido e definido em três cenários de análise, e são elaborados modelos de resolução para cada um dos cenários de forma proceder a uma análise comparativa entre eles.

4. Tratamento dos dados para a resolução do problema – os dados disponíveis para a resolução do problema são analisados e tratados para que possam ser utilizados na aplicação da metodologia desenvolvida.

5. Aplicação dos modelos desenvolvidos ao caso em estudo – na etapa final da dissertação, os modelos são aplicados ao caso de estudo. Os resultados são extraídos e analisados de forma a retirar conclusões sobre o problema em estudo.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada da seguinte forma:

Capítulo 1. Apresenta brevemente o problema do qual trata a dissertação. Como tal, aborda o seu contexto e motivação, bem como a metodologia e os objetivos da dissertação, e ainda a estrutura pelo qual está organizado.

Capítulo 2. São apresentados alguns conceitos relevantes para o problema e o seu enquadramento. O caso de estudo é apresentado, incluindo uma descrição das organizações e dos processos envolvidos no problema.

Capítulo 3. É feita uma extensa revisão da literatura existente relacionada com o caso de estudo e o problema em questão e são resumidas as pesquisas consideradas relevantes para a abordagem do problema.

Capítulo 4. É descrito o método de abordagem, os cenários de análise e os modelos desenvolvidos para a resolução do problema em estudo nesta dissertação.

Capítulo 5. Neste capítulo são apresentados os dados recolhidos sobre a situação atual do problema e a forma como foram tratados na resolução do caso de estudo e aplicação dos modelos desenvolvidos.

Capítulo 6. São apresentados os resultados da aplicação dos modelos heurísticos desenvolvidos ao caso de estudo e respetivos cenários de análise. As distâncias e os tempos de recolha são obtidos para que se possa proceder a uma análise comparativa, incluindo as vantagens e desvantagens de cada cenário no que toca ao fator organizacional do problema.

Capítulo 7. No sétimo e último capítulo apresentam-se as conclusões da dissertação e propõem-se possíveis estudos para serem desenvolvidos no futuro.

Capítulo 2 – Caracterização do Problema

A presente dissertação pretende estudar a implementação de um subsistema de recolha de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) – mais especificamente Resíduos Orgânicos (RO) – no atual Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) da cidade de Lisboa. O estudo foca-se na componente de recolha de resíduos urbanos que se encontra sob responsabilidade do Departamento de Higiene Urbana (DHU) da Direção Municipal de Higiene Urbana (DMHU) da Câmara Municipal de Lisboa (CML).

No âmbito do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU 2020), um dos objetivos da CML passa por aumentar as taxas de reciclagem. Para cumprir este objetivo, a CML pretende alargar a recolha seletiva de orgânicos ao sector doméstico de forma a recolher 4000 toneladas anuais de matéria, e assim, desviar os resíduos orgânicos da deposição em aterros para tratamento e valorização.

Os RO constituem a maior parcela de resíduos indiferenciados produzidos em Portugal e quando são depositados em aterro libertam gases prejudiciais ao ambiente. Se devidamente tratados, estes resíduos podem ser valorizados através da captação do biogás libertado e da produção de fertilizantes.

O problema em estudo consiste, por isso, em incorporar e otimizar a recolha seletiva de resíduos orgânicos no sector doméstico, no âmbito geográfico do projeto piloto (zona de estudo), tendo em conta o fator organizacional – simplicidade de implementação –, o fator económico – minimização dos custos adicionais –, e os constrangimentos associados às características do sistema.

Neste capítulo será feita uma caracterização do problema, incluindo o seu contexto e enquadramento, uma breve apresentação dos conceitos e organizações envolvidas, e ainda uma descrição do sistema de Lisboa e das operações consideradas relevantes.

2.1 Gestão de Resíduos

O rápido crescimento da população mundial, aliado a uma cultura cada vez mais consumista, tem levado à exploração insustentável de recursos que, no final do seu ciclo de vida, se transformam em quantidades astronómicas de resíduos. Em 2016 foram gerados cerca de 2.01 mil milhões de toneladas de RSU e pelo menos 33% ainda são depositados em aterros ou queimados, levando a consequências ambientais, de saúde e até de segurança (Kaza *et al.*, 2018). Tanto a exploração insustentável de recursos como a má gestão dos resíduos daí provenientes contribuem para uma série de problemas, incluindo as alterações climáticas. Para que seja possível construir cidades sustentáveis e com qualidade de vida, é imperativo gerir eficientemente os resíduos produzidos pela nossa sociedade, conferindo-se assim uma importância fulcral ao estudo da disciplina de Gestão de Resíduos.

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) define a **Gestão de Resíduos** como o conjunto de atividades de carácter técnico, administrativo e financeiro necessárias à deposição, recolha, transporte, tratamento, valorização e eliminação dos resíduos, incluindo o planeamento e fiscalização dessas operações, bem como a monitorização dos locais de destino final, depois de se proceder ao seu encerramento.

Os **Resíduos**, por sua vez, são quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011). Estes podem ser agrupados em quatro grandes grupos dependendo da sua origem: industriais, agroindustriais, florestais e sólidos urbanos. Também de acordo com a APA, os **Resíduos Sólidos Urbanos**, também designados por “lixos comunitários”, são os resíduos provenientes de habitações, bem como os que, pela sua natureza ou composição, sejam semelhantes. Dada a sua definição, os RSU agrupam os resíduos domésticos, comerciais, alguns resíduos de pequenas indústrias, resíduos de limpeza de espaços públicos e ainda alguns resíduos especiais.

Os **Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos** incluem várias atividades e infraestruturas. Matos (1996) sugere a sua divisão em duas componentes fundamentais:

- A “remoção”, que engloba as atividades relacionadas com a produção de resíduos nos sectores doméstico e comercial, a deposição e armazenamento dos mesmos em equipamentos de deposição, e a sua recolha e transporte até ao destino final.
- O “destino final” envolve as operações e infraestruturas de tratamento e valorização dos resíduos. O tratamento inclui a triagem, separação, destruição, transformação química e a sua deposição em aterros sanitários. A valorização pode ser energética, quando há produção de energia, ou orgânica, quando há tratamento de materiais biodegradáveis.

Uma boa gestão de resíduos depende da análise detalhada de todos os seus elementos, seja a composição dos resíduos produzidos, as infraestruturas de deposição, a frota e os circuitos que procedem à recolha ou o tratamento que lhes vai ser conferido no final do seu ciclo de vida.

2.2 Enquadramento e Estratégia para os Resíduos em Lisboa

A nível europeu, a gestão de resíduos é considerada uma parte integrante e fundamental da política ambiental. Atualmente está em vigor o 7º Programa de Acção em matéria do Ambiente da União Europeia, sendo um dos seus principais objetivos incentivar o crescimento sustentável e a economia circular, com maior eficiência na utilização dos recursos disponíveis.

A **Economia Circular** pode ser definida como uma economia regeneradora que procura manter a utilidade dos produtos, componentes e materiais e reter o seu valor através do aumento da reutilização e reciclagem em diversas fases da produção, consumo e gestão de resíduos (European Environment Agency (EEA), 2016). A utilização de materiais e a produção de resíduos é minimizada e os resíduos inevitáveis são reciclados, reutilizados ou, quando possível, valorizados, minimizando-se sempre os impactos no ambiente e na saúde humana. Na perspetiva da economia circular, os resíduos passam a ser tratados como recursos.

No âmbito das iniciativas para incentivar a economia circular, a União Europeia criou o projeto FORCE (FOR Circular Economy), que estimula quatro cidades europeias: Copenhaga, Hamburgo, Lisboa e Génova, a envolverem os seus cidadãos e empresas na criação e desenvolvimento de soluções inovadoras para a recolha de diferentes materiais na cadeia de valores: plástico, resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos, resíduos orgânicos e madeira, respetivamente. A cidade de Lisboa, e conseqüentemente a CML, ficam comprometidas a aumentar a recolha de resíduos orgânicos em cerca de 7000 toneladas por ano: 3000 no sector comercial e 4000 no sector doméstico.

A nível nacional, o Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2014-2020 (PNGR), propõe uma estratégia para a gestão de resíduos em Portugal. O PNGR inclui o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU 2020), que é o atual instrumento de referência da política de gestão de RSU. O PERSU 2020, em articulação com as metas europeias, estabelece a visão, os objetivos e as metas globais e específicas para cada sistema de gestão de RSU em Portugal, e as medidas a implementar entre 2014 e 2020, bem como a estratégia que suporta a sua execução. Com uma gestão de resíduos centrada numa economia circular, o PERSU 2020 estabelece como principais objetivos para o cumprimento de metas a nível nacional os descritos na Tabela 1.

Estes objetivos estão associados a indicadores e metas que se definem não só a nível nacional, como também especificamente para cada um dos sistemas de gestão em Portugal. Para este estudo, interessam as metas atribuídas à Valorsul e à CML, as duas organizações responsáveis pela Gestão de Resíduos em Lisboa.

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 dos resíduos urbanos produzidos em 19 municípios da Área Metropolitana de Lisboa Norte e da Região do Oeste, incluindo o município de Lisboa.

De acordo com o contrato celebrado entre a CML e a Valorsul, todos os resíduos urbanos recolhidos pelo Município de Lisboa têm que ser entregues à Valorsul para posterior tratamento e valorização. Pelo que, no corrente SGRU a operar em Lisboa, a CML é responsável pela componente de “remoção”, enquanto a Valorsul é responsável pela componente do “destino final”.

Tabela 1 – Objetivos do PERSU 2020

| | |
|---|---|
| Prevenção da produção e perigosidade dos Resíduos Urbanos | Aumento da preparação para reutilização, da reciclagem e da qualidade dos recicláveis |
| Redução da deposição de Resíduos Urbanos em aterro | Valorização económica e escoamento dos recicláveis e subprodutos do tratamento dos Resíduos Urbanos |

A nível regional, e em articulação com o PNGR, PERSU 2020, e com a Valorsul, o Plano Municipal de Gestão de Resíduos (PMGR) da cidade de Lisboa pretende definir a estratégia e as ações a desenvolver pela CML quanto à gestão de resíduos urbanos na área do município.

O plano de ação da CML está estruturado em três objetivos estratégicos e quatro objetivos de suporte (ver Tabela 2) com vista ao cumprimento dos objetivos, metas e medidas previstas no PERSU 2020. Os objetivos estratégicos são os que contribuem diretamente para o cumprimento das metas, enquanto os objetivos de suporte contribuem também para os objetivos do PERSU, mas indiretamente para o cumprimento das metas.

Tabela 2 - Estratégia de Acção do Município de Lisboa

| | |
|--------------------------------|---|
| Objectivo Estratégico 1 | Redução da produção de resíduos |
| Objectivo Estratégico 2 | Aumento da reciclagem e qualidade dos materiais |
| Objectivo Estratégico 3 | Alargamento da rede de centros de receção de resíduos |
| Objectivo de Suporte 1 | Aposta na inovação e desenvolvimento tecnológico |
| Objectivo de Suporte 2 | Promoção de sinergias e redes de colaboração |
| Objectivo de Suporte 3 | Reforço do envolvimento dos munícipes |
| Objectivo de Suporte 4 | Eficiência, eficácia e sustentabilidade |

A presente dissertação surge no âmbito de dois destes objetivos. O Objetivo Estratégico 2 (OE2), no qual uma das medidas é o alargamento da recolha seletiva de orgânicos, que contribui diretamente para o aumento da preparação para reutilização, da reciclagem e da qualidade dos recicláveis e para a redução de deposição de RSU em aterro (objetivos do PERSU 2020); e o Objetivo de Suporte 4 (OS4) no qual uma das medidas é a melhoria da qualidade dos dados e otimização da recolha e transporte de resíduos.

2.3 Resíduos Orgânicos

Um dos principais fluxos de RSU são os **Resíduos Orgânicos (RO)** ou **Resíduos Urbanos Biodegradáveis (RUB)**, que incluem restos de comida, borras de café, saquetas de chá, toalhas, toalhetes e guardanapos de papel, resíduos alimentares e restos de cozinha provenientes de cantinas, restaurantes, mercados, hotéis e outros estabelecimentos comerciais e ainda resíduos de jardins e outros resíduos putrescíveis (Valorsul, 2018).

Dos resíduos urbanos depositados em aterros, os orgânicos são os principais responsáveis pela libertação de gases com efeito de estufa na atmosfera, devido ao metano produzido durante a sua decomposição (Kaza *et al.*, 2018).

Atualmente, apenas os RO produzidos em alguns mercados, cantinas, restaurantes, hotéis e estabelecimentos similares são recolhidos pela CML e entregues na Estação de Tratamento e Valorização Orgânica (ETVO) para serem submetidos a processo de valorização. No entanto, são os resíduos mais abundantes no fluxo de indiferenciados o que, aliado à sua capacidade de valorização, lhes confere um grande potencial de exploração no sector doméstico e nos restantes estabelecimentos comerciais e torna-os num alvo interessante para o desenvolvimento de medidas que ajudem ao cumprimento das metas estabelecidas no PERSU 2020.

Assim, o objectivo da CML passa por aumentar a recolha seletiva de resíduos orgânicos em entidades e alargar este sistema, quanto possível, ao sector doméstico. Esta medida é fundamental para aumentar a taxa de reciclagem e diminuir a taxa de RSU depositados em aterro.

2.3.1 Caracterização dos Resíduos Indiferenciados

A maior parte do fluxo de indiferenciados recolhidos nos municípios sob responsabilidade da Valorsul são RO (41%). Uma vez que a caracterização média dos RSU produzidos em Portugal é aproximadamente homogénea (Câmara Municipal Lisboa, 2016), é possível considerá-la equivalente à composição dos resíduos indiferenciados produzidos em Lisboa.

A composição física dos resíduos indiferenciados que chegam à Valorsul está representada na Figura 1 através das percentagens relativas do peso de cada material constituinte do fluxo total de indiferenciados (Câmara Municipal Lisboa, 2016).

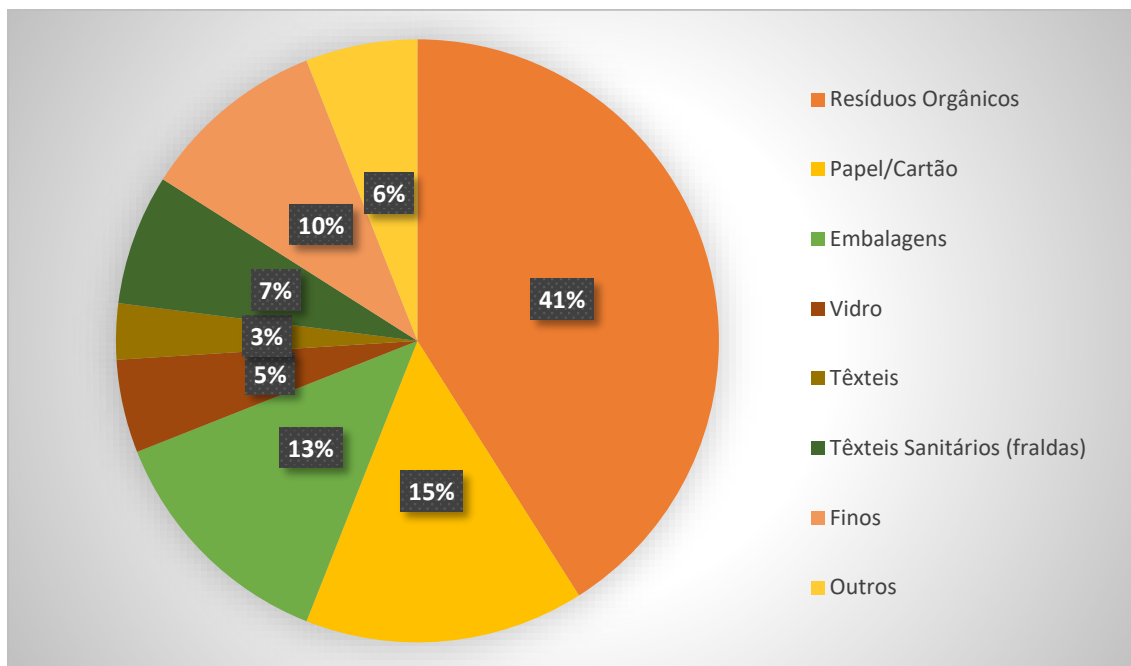


Figura 1 - Composição física dos indiferenciados na área de intervenção da Valorsul (2014)

2.3.2 Valorização Orgânica

Os RO produzidos em Lisboa são recolhidos pela CML e entregues diretamente na Estação de Tratamento e Valorização Orgânica (ETVO), instalada em São Brás, no concelho da Amadora. Os resíduos são submetidos a um processo de digestão anaeróbia (tratamento em ambiente fechado e ausência de oxigénio), seguido de um processo de compostagem, que origina a produção de biogás (gás da fermentação) e de um composto orgânico. O biogás, que em caso de deposição em aterro seria naturalmente produzido e libertado na atmosfera com consequências ambientais, é captado e aproveitado para a produção de energia elétrica, posteriormente exportada para a Rede Elétrica Nacional como “energia verde”. O composto orgânico remanescente pode ser utilizado como corretivo agrícola (sem aditivos químicos) de solos na jardinagem e agricultura (Valorsul, 2016).

2.4 O Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos de Lisboa

No Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) de Lisboa, o Departamento de Higiene Urbana (DHU) da Direção Municipal de Higiene Urbana (DMHU) da Câmara Municipal de Lisboa (CML) é responsável pela recolha e transporte dos resíduos indiferenciados e dos materiais recicláveis, garantindo o seu encaminhamento para adequado tratamento e valorização. Este serviço inclui a recolha dos resíduos orgânicos, que serão o principal alvo do estudo. Por sua vez, a Valorsul é responsável pelo respetivo tratamento e valorização dos resíduos recolhidos pelo DHU.

2.4.1 Equipamento de Remoção

O equipamento envolvido nos serviços de recolha operados pelo DMHU incluem fundamentalmente os equipamentos de deposição e os veículos de recolha.

Os equipamentos de deposição são os depósitos onde os resíduos produzidos no distrito de Lisboa são armazenados até que sejam removidos e transportados até aos respetivos locais de tratamento. Englobam ecopontos, vidrões, pilhões, papeleiras e contentores. Os ecopontos designam um conjunto de três contentores para a deposição seletiva de três tipos de resíduos: papel e cartão, vidro, e embalagens de plástico e metal. Vidrões, pilhões e papeleiras são os depósitos destinados exclusivamente aos fluxos de vidro, pilhas, e papel e cartão, respetivamente. Por fim, os contentores são depósitos versáteis de diferentes capacidades volumétricas (ver Tabela 3), que se ajustam a diversos tipos de resíduos e modelos de operação. Os contentores com capacidade inferior a 340 litros são utilizados em edifícios de médio e alto porte, moradias e bairros históricos e contentores com capacidades entre os 120 e 1100 litros são utilizados em entidades comerciais. São instalados conforme o nível de produção de cada edifício ou entidade. As tampas podem ser coloridas para que seja possível distinguir quais os tipos de resíduos devem ser depositados. Atualmente estão distribuídos quase 200 mil equipamentos de deposição pela cidade de Lisboa, dos quais 180 mil são contentores.

A frota a operar os serviços do DMHU inclui 219 viaturas, das quais 152 são destinadas à remoção e as restantes a atividades auxiliares como a limpeza de contentores e recolha de outro tipo de resíduos fora do âmbito do estudo. Os veículos têm capacidades entre 4m³ e 16m³ (ver Tabela 4), podem recolher qualquer tipo de material e não possuem caixa compartimentada, o que implica que podem transportar qualquer tipo de resíduo, mas só um cada vez. Também estão munidos de um sistema de compactação capaz de reduzir o volume dos resíduos.

Tabela 3 - Contentores (2014)

| Volume | Nº de Contentores | Volume | Nº de Contentores |
|--------------|-------------------|-------------|-------------------|
| 50 Litros | 227 | 360 Litros | 7.450 |
| 90 Litros | 14.346 | 660 Litros | 333 |
| 110 Litros | 60 | 770 Litros | 105 |
| 140 Litros | 66.851 | 1000 Litros | 1.258 |
| 240 Litros | 82.260 | 1100 Litros | 7.116 |
| Total | | | 180.006 |

Tabela 4 - Frota de remoção (2014)

| Capacidade | Nº de Viaturas | Capacidade | Nº de Viaturas |
|----------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
| 4/5 m ³ | 3 | 10/12 m ³ | 7 |
| 7/8 m ³ | 35 | 14/16 m ³ | 95 |
| 7/8 m ³ (vidro) | 7 | 15 m ³ (ecopontos) | 5 |
| Total | | | 152 |

2.4.2 Infraestruturas

O SGRU de Lisboa é composto por diversas infraestruturas que são essenciais ao seu funcionamento das quais, no âmbito deste estudo, são relevantes três. A garagem, situada nos Olivais e onde todos os veículos são guardados, será o ponto de partida e o destino final de todos os veículos. A ETVO, localizada na Amadora, e a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (CTRSU), localizada em São João da Talha, onde os resíduos orgânicos e indiferenciados são respetivamente descarregados e tratados. No final de cada circuito ou sempre que a capacidade máxima de uma viatura seja alcançada, os resíduos transportados devem ser descarregados nas respetivas estações de tratamento.

2.4.3 Operações

A cidade de Lisboa, enquanto capital e polo atrativo de bens, pessoas e serviços, destaca-se a nível nacional pelas elevadas quantidades de materiais valorizáveis que são produzidos. De acordo com o tipo de produtores, morfologia urbana e características socioeconómicas de cada área, existem várias soluções de deposição e recolha em Lisboa, incluindo a recolha seletiva e indiferenciada porta a porta nos sectores residencial e comercial, o sistema pneumático do Parque das Nações, as recolhas a pedido e a deposição coletiva em ecopontos ou ecoilhas.

As operações de recolha Porta-à-Porta (PaP) tem sido a solução mais eficaz, tanto ao nível dos resíduos indiferenciados como dos materiais recicláveis, servindo atualmente cerca de 60% da cidade de Lisboa. É uma solução que se adapta bem a uma cidade compacta, com alta densidade de produtores de resíduos e constrangimentos a nível do espaço público.

A colaboração de todos os intervenientes é fulcral para uma boa gestão de resíduos e a proximidade junto dos consumidores que o PaP proporciona leva a melhorias significativas nas taxas de reciclagem (Câmara Municipal Lisboa, 2016).

No SGRU de Lisboa os pontos de recolha são agrupados de acordo com diferentes fileiras de resíduos em circuitos, que por sua vez são realizados por diferentes operações e num dado horário. Cada ponto de recolha agrega ainda vários contentores destinados aos diversos fluxos, que podem estar dispersos ao longo de uma via de circulação de veículos.

No âmbito deste estudo são relevantes duas soluções: a operação PaP de recolha seletiva e indiferenciada no sector doméstico, realizada de acordo com um calendário semanal, e a operação PaP de recolha de orgânicos em entidades comerciais, com frequência diária. Estas operações serão descritas adiante com maior detalhe.

Ambas as operações PaP são executadas por uma viatura de remoção, tripulada por um motorista e dois cantoneiros, e seguem o seguinte percurso:

1. Saída da garagem, nos Olivais, onde o motorista se encontra com os cantoneiros;
2. Início do circuito. Cada percurso está afeto a um só fluxo de resíduos;
3. Recolha dos resíduos nos respetivos pontos de recolha;
4. Se a carga exceder a capacidade do veículo, será realizado um frete de descarga, e o circuito é retomado até à recolha do último contentor;
5. Final do circuito. O veículo desloca-se até à ETVO (no caso dos orgânicos), para pesagem e despejo da carga recolhida, e regressa à garagem, nos Olivais;

PaP de Recolha Seletiva no Sector Doméstico

Nesta operação, os resíduos são removidos nos Pontos de Recolha (PR) através de contentores de utilização individual que são atribuídos a moradias, edifícios e condomínios. Uma vez que esta operação se destina a recolher três fluxos distintos de resíduos, os contentores estão equipados com tampas coloridas para a sua distinção: preto para os indiferenciados, amarelo para as embalagens e azul para o papel e cartão.

Todos os circuitos são noturnos para evitar atrasos com o trânsito local, à exceção de um circuito em Telheiras que, por falta de recursos, é diurno. Os turnos têm duração de 7h e 30m, sendo que os noturnos começam às 22h e o diurno às 5h30m. A cidade está dividida nas áreas oriental e ocidental, para alternar os dias de recolha, de acordo com o calendário da Figura 2. Nestes circuitos a recolha de indiferenciados têm frequência trissemanal, as embalagens bissemanal e o papel e cartão apenas semanal. Todos os circuitos são executados de segunda a sábado, sendo domingo o dia de descanso. Atualmente existem 48 circuitos dedicados a esta operação.

| | 2ª Feira | 3ª Feira | 4ª Feira | 5ª Feira | 6ª Feira | Sábado |
|----------------|---|---|---|---|---|---|
| Área Ocidental |  |  |  |  |  |  |
| Área Oriental |  |  |  |  |  |  |

Figura 2 - Calendário Semanal da Operação PaP de Recolha Seletiva no Sector Doméstico

PaP de Orgânicos em Entidades

Tal como no PaP no sector doméstico, a recolha em entidades é realizada através de contentores de utilização individual, mas estes são atribuídos a entidades gestoras de espaços comerciais, nomeadamente os “bons” produtores de resíduos orgânicos, como cantinas, restaurantes, mercados ou hotéis. Esta operação destina-se unicamente à recolha de RO.

Os circuitos podem ser noturnos ou diurnos, com início às 22h ou às 12h30m, respetivamente, e duração de 7h e 30m. Todos os circuitos são operados diariamente, de segunda a sábado, à exceção de um circuito no centro de Lisboa projetado para recolher os resíduos das entidades com maior taxa de produção, que opera unicamente ao domingo. Uma vez que os resíduos são removidos em entidades comerciais, os PR estão sujeitos horários de serviço específicos para não perturbar o bom funcionamento das mesmas. Esta operação conta com 14 circuitos, dos quais cinco são executados em horário diurno e os restantes em horário noturno.

2.5 Definição do Problema

Uma vez resumidos os objetivos para a gestão de resíduos a nível europeu, nacional e regional, podemos destacar como pontos fulcrais o aumento das taxas de reciclagem, e a eficiência e eficácia do SGRU em todas as suas vertentes.

Os resíduos orgânicos assumem uma importância preponderante, uma vez que são a maior componente física dos resíduos indiferenciados e, portanto, aqueles que implicarão maiores incrementos na quantidade de resíduos reciclados. Por outro lado, a componente de transporte e recolha é responsável pela maioria custos totais de um SGRU, pelo que, melhoramentos nesta área têm um impacto significativo na economia global da gestão de resíduos.

De modo a cumprir os seus objetivos, a CML pretende alargar a recolha seletiva de orgânicos ao sector doméstico. As principais preocupações são o desenvolvimento de um plano cuja implementação na prática seja simples e rápida do ponto de vista organizacional, e com o mínimo de custos adicionais do ponto de vista económico.

Assim, a otimização da solução para a incorporação da recolha de resíduos orgânicos no sistema terá em conta dois fatores:

- **Fator organizacional**, ligado ao número de alterações efetuadas ao sistema e ao aumento da duração dos circuitos após a incorporação dos novos pontos de recolha.
- **Fator económico**, que se reflete na minimização dos custos operacionais, em função da distância percorrida pelos veículos.

A escolha do conjunto de PR de orgânicos que irão integrar o sistema terá em conta dois requisitos fundamentais. A previsão do total de resíduos produzidos deverá ser semelhante às 4000 toneladas anuais que se pretendem recolher e as infraestruturas dos edifícios em questão deverão ter condições para instalar os contentores de armazenagem de RO. Estes contentores terão a tampa castanha, para se distinguirem dos restantes contentores de recolha seletiva.

Baseado nestes requisitos, a CML propôs uma zona de estudo que inclui um conjunto de 72 pontos de recolha que se adequassem, pelas suas características, à integração de resíduos orgânicos no SGRU de Lisboa. Este conjunto de PR estão situados na Alta de Lisboa, e interferem com quatro circuitos de PaP de Recolha Seletiva no Sector Doméstico entre as freguesias do Lumiar, Santa Clara e Alvalade. O conjunto de PR será referido como zona do projeto piloto ou projeto piloto ou PP.

Na caracterização das operações relevantes ao estudo foram indicadas algumas restrições importantes para a definição do problema. Na operação PaP de recolha seletiva no sector doméstico existe um calendário e frequências de recolha que devem ser cumpridas. O calendário deverá ser alterado de forma a acomodar a inserção da recolha de resíduos orgânicos. Na operação PaP de orgânicos em entidades devem ser respeitados os horários de serviço.

Desta forma, podemos concluir que o problema em estudo consiste em incorporar e otimizar a recolha de resíduos orgânicos no sector doméstico, no âmbito geográfico do projeto piloto, de acordo com os fatores organizacional e económico, e de tal forma que se tenham em conta os seguintes objetivos e condições:

- Recolher aproximadamente 4000 toneladas anuais de resíduos orgânicos;
- Encontrar uma solução simples e eficaz de implementar na prática;
- Minimizar os custos adicionais da implementação dos novos PR através da redução de distâncias percorridas durante a realização dos novos circuitos;
- A duração dos circuitos pode exceder a duração dos turnos, embora o objetivo seja evitar e reduzir essa situação;
- A quantidade recolhida por cada veículo, em cada circuito, não deverá exceder a sua capacidade, com a consequência de ter custos adicionais associados à realização de fretes de descarga;
- É assumido que existem sempre veículos disponíveis;
- Cada circuito deverá começar e terminar na garagem nos Olivais;

Capítulo 3 – Revisão da Literatura

Neste capítulo é feita uma revisão da literatura nas áreas da Gestão de Resíduos e da Investigação Operacional sobre modelos e técnicas de resolução de problemas de otimização de rotas de veículos que se ajustem a problemas de recolha de resíduos e que se julga serem relevantes para abordar o caso em estudo, cujo problema foi definido no capítulo anterior.

Inicialmente é introduzido o tema da gestão de resíduos, mais propriamente da componente de transporte e recolha. São descritas algumas definições para definir o âmbito da revisão da literatura, como os vários níveis de decisões existentes num SGRU – domínio estratégico, tático e operacional –, e a classificação dos problemas de rotas quanto à sua descrição matemática – em *Arc Routing Problem* ou *Node Routing Problem* – e ao tipo de dados e informação – determinísticos ou estocásticos e dinâmicos ou estáticos.

Uma vez feita essa classificação, foi selecionado e definido o *Vehicle Routing Problem* (VRP) como ponto de partida mais indicado para este estudo. O problema do VRP será definido, bem como as respetivas técnicas de resolução. Estas podem ser classificadas em Métodos Exatos, Heurísticas Clássicas e Metaheurísticas. São descritos algumas heurísticas clássicas de maior sucesso histórico – como o método das poupanças, o algoritmo Sweep, e o GAP – e ainda as metaheurísticas mais importantes – GRASP, Pesquisa Tabu, Algoritmos Genéticos, Arrefecimento Simulado, Otimização por Colónias de Formigas, e Pesquisa de Vizinhança.

Por fim, foram selecionadas e descritas as extensões que se afiguram mais adequadas para a resolução do problema em estudo, nomeadamente o PVRP e o VRPTW e descritas algumas das adaptações mais importantes de técnicas para resolução destes modelos.

3.1 Recolha de Resíduos

A Gestão de Resíduos, já definida no capítulo anterior, é uma disciplina complexa que envolve diversas decisões com múltiplos critérios a nível ambiental e socioeconómico. Para conceber um SGRU sustentável, os *stakeholders* devem estabelecer objetivos e estratégias para que as decisões possam convergir numa só direção (Soltani *et al.*, 2015). A utilização de técnicas de Investigação Operacional (IO), como a modelação e otimização, são essenciais no apoio à decisão, redução de custos e melhorias no desempenho dos SGRU (Pires *et al.*, 2018).

As decisões podem ser classificadas de acordo com o seu impacto no horizonte temporal em estratégicas, táticas e operacionais (Ghiani *et al.*, 2014).

No **domínio estratégico** temos todas as decisões de longo prazo que tenham impacto de longa duração e custos financeiros elevados, tais como:

- Seleção de tecnologias de tratamento dos RSU e recuperação de energia;
- Localização das estações de transferência e tratamento de RSU;
- Dimensionamento das instalações, incluindo futuras expansões;
- Economias de escala.

O **domínio tático**, por sua vez, engloba as decisões de médio prazo:

- Alocação dos fluxos de resíduos às estações de tratamento;
- Divisão do território em zonas de serviço;
- Composição da frota de veículos e tripulação;
- Atribuição de dias de recolha para cada zona de serviço e tipo de resíduos.

Quanto ao **domínio operacional**, podemos incluir todas as decisões com impacto a curto prazo nas operações do SGRU, por exemplo:

- Seleção dos dias de recolha para cada dia da semana e tipo de resíduo;
- Definição e escalonamento das rotas dos veículos de recolha.

O problema em estudo neste trabalho é um caso prático da componente de recolha e transporte de um Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos e coloca-se essencialmente ao nível tático e operacional. No **domínio tático** insere-se a seleção de um conjunto de pontos de recolha, entre as opções propostas pela CML, a sua incorporação no sistema em vigor. O **domínio operacional** conta com a configuração e otimização das rotas que vão incluir os novos pontos de recolha.

Geralmente, em problemas de otimização de rotas na área da gestão de resíduos, é dado um mapa duma região com a localização de partida dos veículos e dos vários locais de recolha e descarga de resíduos. Este mapa pode ser transformado num grafo com um conjunto de vértices e um conjunto de arcos.

O primeiro problema que nos é imposto é se queremos que a rota percorra um subconjunto específico de arcos ou os nós do grafo (Beltrami & Bodin, 1974). Surge assim a classificação dos problemas, segundo a sua descrição matemática, em duas grandes classes: *Arc Routing* no primeiro caso e *Node Routing* no segundo.

Alguns exemplos de problemas de **Arc Routing** são o *Chinese Postman Problem* (Eiselt, Gendreau & Laporte, 1995) e o *Rural Postman Problem* (Eiselt, Gendreau & Laporte, 1995b) e são utilizados em situações como a recolha urbana em vários pontos ao longo das ruas, limpeza de neve ou varrimento de ruas. Por sua vez, o exemplo mais básico de problemas de **Node Routing** é o *Traveling Salesman Problem* (TSP) no qual um veículo deverá percorrer todos os nós de um grafo com o menor custo possível, seja tempo ou distância (Flood, 1956). Uma das generalizações mais populares do TSP é o *Vehicle Routing Problem* (VRP), que será descrito na secção seguinte com algum detalhe.

No presente estudo, o problema envolve a recolha e transporte de resíduos numa área urbana, mas os locais a visitar (edifícios) são dispersos e afastados entre si e não se encontram em vários pontos ao longo das ruas. Assim, torna-se mais adequado representar os locais a visitar por nós e estudar problemas do tipo **Node Routing**.

Uma vez que, dentro da disciplina da gestão de resíduos, estamos a tratar particularmente de problemas de veículos e transportes, podemos estabelecer duas divisões do problema relativamente aos dados de que dependem (Teixeira, 2002):

- **Estocásticos** ou **determinísticos** caso exista ou não incerteza nos dados que serão utilizados no modelo, como a procura, localização dos clientes ou tempo de viagem. Nos modelos determinísticos, os dados de entrada são valores médios calculados previamente. Nos modelos estocásticos, os *inputs* são calculados aleatoriamente em função de uma probabilidade.
- **Estáticos** ou **dinâmicos** conforme os dados se mantenham ou alterem ao longo do processo de resolução do problema. Nos modelos estáticos as soluções (rotas) são pré-definidas, ao nível tático, e são revistas e ajustadas periodicamente conforme grandes alterações nos dados. Por sua vez, nos modelos dinâmicos, as soluções são definidas repetidamente, ao nível operacional, ajustando-se constantemente à alteração dos dados de entrada.

Face ao caso de estudo, as variáveis a ter em conta e a simplicidade necessária para a resolução do problema, apenas se consideram modelos **determinísticos** e **estáticos**.

3.2 Vehicle Routing Problem

O *Vehicle Routing Problem* (VRP), assim conhecido na literatura científica, é uma designação genérica para uma classe de problemas que se ocupa da construção de um conjunto de rotas para uma frota de veículos que pretendem visitar um conjunto de clientes/localidades. Foi introduzido pela primeira vez por Dantzig & Ramser (1959) com o nome “*The Truck Dispatching Problem*” quando modelaram uma frota de veículos homogêneos que pretendia servir um conjunto de gasolinhas a partir de um depósito.

O VRP pode ser descrito como um problema de conceção de rotas ótimas para um conjunto de clientes (pontos de entrega ou recolha) geograficamente dispersos a visitar, a partir de uma origem – designada de depósito – e sujeito a um conjunto de restrições (Laporte, 2009). Uma vez que o problema implica a existência de mais que um veículo, os objetivos passam por definir o conjunto de clientes a servir por cada veículo e encontrar o caminho de menor custo a percorrer por cada veículo, ou seja, a sequência de clientes que cada veículo deve visitar. Desta forma, o VRP é uma extensão natural do TSP, ao qual se acrescenta um nível de decisão.

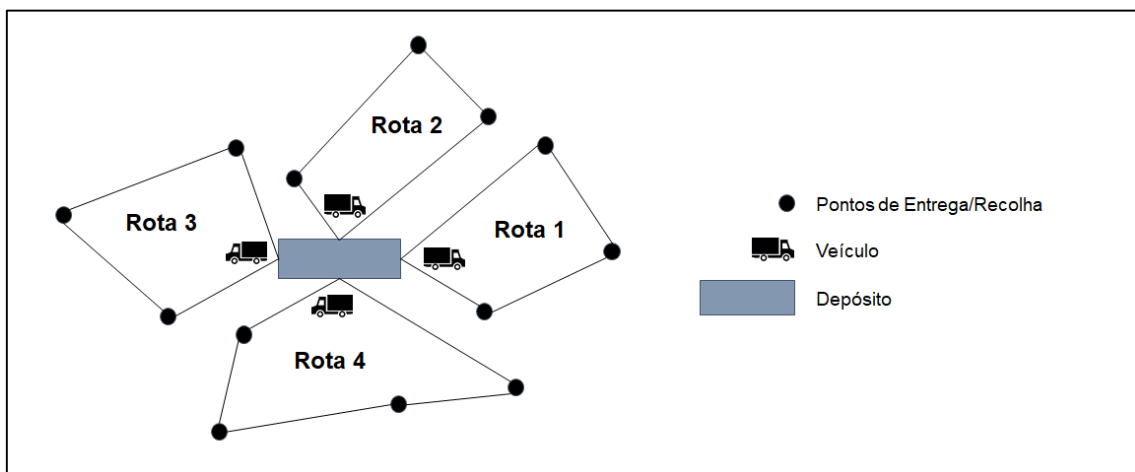


Figura 3 - Ilustração do VRP

Consideremos os seguintes parâmetros do problema:

- n - número de pontos de entrega/recolha a servir;
- m - número de veículos da frota;
- Q_k - capacidade do veículo k ($k = 1, \dots, m$);
- q_i - procura/quantidade a entregar ao cliente i ($i = 1, \dots, n$);
- c_{ji} - custo de viagem entre os clientes i e j (distância ou tempo);
- D_k - duração máxima da rota do veículo k .

O VRP clássico, geralmente, pode ser formulado por um grafo $G = (V, A)$, constituído pelo conjunto de nós $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ e o conjunto de arcos $A = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V, i \neq j\}$. O nó v_0 representa o depósito e os restantes nós correspondem aos clientes (pontos de entrega ou recolha) a visitar. Por sua vez, os arcos representam ligações entre os nós v_i e v_j e têm custos associados (por exemplo, distância ou tempo). O problema consiste em estabelecer m rotas de custo mínimo, uma por veículo, de modo a que:

- a) Cada rota k comece e termine no depósito v_0 ;
- b) Cada cliente v_i (exceto v_0) pertença a uma só rota;
- c) A quantidade total distribuída ou recolhida pelo veículo k não exceda Q_k ;
- d) A duração da rota não exceda D_k .

Para efeitos de modelação matemática, consideram-se as variáveis de decisão binárias x_{ijk} , nas quais o valor 1 significa que os nós i e j são visitados pelo veículo k , deslocando-se de i para j através do arco (v_i, v_j) e o valor 0 significa que o arco não é percorrido.

É importante notar que, tal como o VRP é uma generalização do TSP, inversamente, o TSP clássico é um caso específico do VRP no qual $m = 1$, ou seja, só há um veículo, e $Q_k = \infty$, de tal modo que a capacidade deixa de ser um parâmetro a ter em conta e o nível de decisão relacionado com o conjunto de clientes a servir por cada veículo deixa de existir.

O VRP é um dos problemas clássicos de IO e tem sido alvo de intenso estudo nas últimas décadas. Tem uma importância teórica fundamental para a disciplina, uma vez que, como uma generalização do TSP, pertence à classe dos problemas NP-difíceis, não existindo ainda nenhum algoritmo que resolva o problema em tempo polinomial (Lenstra & Rinnooy Kan, 1981). Face a problemas NP-Difíceis, os métodos exatos raramente são aplicáveis a problemas de dimensão industrial apreciável e recorre-se frequentemente a métodos heurísticos para a sua resolução.

Para além da sua importância teórica, as suas aplicações práticas são frequentemente referidas na literatura e abrangem diversas áreas, como a distribuição de combustíveis, distribuição de mercadorias ou serviços a clientes, indústria do retalho, definição e escalonamento de rotas de autocarros escolares, entregas expresso de encomendas, entregas de jornais nos retalhistas, recolha de leite e derivados em pequenos produtores, definição e dimensionamento de uma frota, distribuição de longo curso com tratores e reboques, e claro, a recolha de resíduos sólidos (Fisher & Jaikumar, 1981; Laporte, 2007).

3.3 Técnicas de Resolução do VRP

O estado de arte no referente ao VRP, incluindo as suas variantes, já justificava em 2009 uma revisão taxonómica com 1021 artigos (Eksioglu, Vural & Reisman, 2009), e uma outra com 277 artigos publicados entre 2009 e 2015 e classificados de acordo com a mesma taxonomia (Braekers, Ramaekers & Van Nieuwenhuysse, 2016). Para a sua resolução, encontramos na literatura um extenso número de algoritmos e revisões dos mesmos, por exemplo nos trabalhos de Laporte (1992), Gilbert & Osman (1995) e Gendreau, Laporte & Potvin (2011).

Estas técnicas são tipicamente classificadas em Métodos Exatos, Heurísticas Clássicas e Metaheurísticas (Laporte, 2009). De acordo com Cordeau *et al.* (2002) as técnicas heurísticas devem ser avaliadas de acordo com quatro critérios:

- Precisão – qualidade e consistência das soluções produzidas;
- Velocidade – tempo computacional utilizado até atingir boas soluções;
- Simplicidade – facilidade de compreensão e implementação computacional;
- Flexibilidade – capacidade de adaptação a novas características.

3.3.1 Métodos Exatos

Os Métodos Exatos podem ser classificados em três categorias principais (Nobert & Laporte, 1987): métodos de pesquisa em árvore (*Direct Tree Search*), programação dinâmica (*Dynamic Programming*) e programação linear inteira (*Integer Linear Programming*). Alguns exemplos de algoritmos exatos presentes na literatura são propostos por Christofides, Mingozzi & Toth (1981), Toth & Vigo (2002) e Baldacci, Christofides & Mingozzi (2008).

Atualmente existem alguns algoritmos exatos capazes de resolver o TSP com centenas ou milhares de nós (Applegate *et al.*, 2009). No entanto o VRP, como generalização do TSP, é muito mais difícil de resolver na prática. Fukasawa *et al.* (2006) e Baldacci, Christofides & Mingozzi (2008) desenvolveram algoritmos exatos capazes de resolver instâncias com até 135 clientes, e mais recentemente Pecin *et al.* (2017) resolveram alguns problemas com 360 clientes.

As aplicações práticas do VRP excedem frequentemente esta dimensão e, para além disso, os algoritmos exatos são muito sofisticados e frequentemente demasiado complexos, pelo que, a sua compreensão se torna difícil. Assim, a maioria dos algoritmos usados na prática são heurísticas e metaheurísticas. A sua popularidade têm aumentado nos últimos anos provocando o desenvolvimento de uma grande diversidade de algoritmos. Este estudo não é exceção e, como tal, face à complexidade e dimensão do problema em análise e à simplicidade e flexibilidade necessária, será dado maior destaque às heurísticas e metaheurísticas.

3.3.2 Heurísticas Clássicas

As heurísticas clássicas podem ser definidas como algoritmos aproximados que não permitem a deterioração de soluções intermédias durante o processo de busca de melhores soluções (Laporte, 2009). Geralmente estão focadas em procedimentos de construção e melhoria, com exploração limitada do espaço de soluções. Produzem soluções de boa qualidade com tempos de cálculo relativamente reduzidos (Cordeau *et al.*, 2002).

Segundo Cordeau *et al.* (2007), podemos classificar as heurísticas clássicas em três categorias:

- **Heurísticas de Duas Fases.** Baseiam-se na decomposição do VRP em dois problemas distintos: agrupar os clientes (nós) em subconjuntos e alocar cada um a um veículo, e determinar a sequência de nós a visitar para cada rota. Podemos assim subdividir este grupo de heurísticas em dois tipos:
 - *Cluster First - Route Second:* agrupam os nós primeiro e depois constroem as rotas para cada grupo independentemente. Um exemplo é o algoritmo *Sweep*, introduzido pela primeira vez por Wren & Holliday (1972) e popularizado por Gillet & Miller (1974);
 - *Route First - Cluster Second:* constroem uma rota englobando todos os nós, eventualmente não admissível, que depois é particionada em rotas elementares admissíveis. Alguns exemplos são dados por Beasley (1983), Haimovich & Rinnooy Kan (1985) e Bertsimas & Simchi-Levi (1996). Numa outra abordagem, é construído um grande conjunto de rotas admissíveis, e depois é selecionado o melhor subconjunto de rotas. Esta abordagem é explorada por Ryan, Hjorring & Glover (1993) e Renaud, Boctor & Laporte (1996).

- **Heurísticas Construtivas.** Tipicamente partem de uma solução inicial vazia ou não admissível, e constroem a solução adicionando um nó de cada vez ou unindo rotas parciais, segundo um critério “guloso” de mínimo custo de inserção ou de máxima poupança. Podem ser especificadas três características: o critério de arranque, o critério de seleção para o cliente que vai ser inserido, e o critério de inserção para a alocação do cliente na rota atual. Alguns exemplos são dados por Clarke & Wright (1964), com o método das poupanças, o mais popular dentro desta classe de heurísticas, e Mole & Jameson (1976).

- **Heurísticas de Melhoria Local.** Partindo de uma solução admissível, aplicam iterativamente modificações simples na estrutura das rotas, tais como trocas e movimentos de arcos ou nós numa rota ou entre rotas, em busca de melhores soluções. Estes algoritmos são usados geralmente para melhorar soluções geradas por outros métodos. Alguns exemplos incluem os métodos de Lin (1965) e Lin & Kernighan (1973) para trocas dentro de uma rota e de Thompson & Psaraftis (1993) e Van Breedam (2001) para trocas entre rotas.

Descrevem-se de seguida, em termos genéricos, as heurísticas clássicas que se destacam pela sua simplicidade de compreensão e implementação, velocidade e precisão na obtenção de resultados ou adaptabilidade a variantes do VRP (Cordeau *et al.*, 2002).

Método das Poupanças. Clarke & Wright (1964) apresentam uma heurística construtiva baseada no conceito de poupança (“*savings*” na literatura inglesa). O algoritmo começa por uma solução inicial com n rotas elementares do tipo “depósito – cliente – depósito” e por calcular a poupança de combinar dois clientes numa só rota. Em cada iteração, são combinados os pares de clientes que maximizam a poupança, tendo em conta as restrições de capacidade do veículo e duração total da rota. O número de veículos é uma variável de decisão. A construção de rotas pode ser efetuada em paralelo ou sequencialmente, consoante se construam rotas parciais para todos os veículos ou se adicionem clientes a uma rota até o veículo estar completo. Este algoritmo é simples de implementar e produz soluções satisfatórias. Desde a sua conceção foram introduzidos diversos melhoramentos (Golden, Magnanti & Nguyen, 1977; Nelson *et al.*, 1985; Paessens, 1988; Altinkemer & Gavish, 1991; Wark & Holt, 1994).

Algoritmo Sweep. Gillet & Miller (1974) apresentam uma heurística do tipo *cluster first - route second*. O algoritmo começa por formar grupos (“*clusters*”) através da rotação de um eixo centrado no depósito que, ao girar, aloca gradualmente os clientes a um veículo até esgotar a sua capacidade ou exceder a duração permitida da rota. O processo é repetido até que todos os clientes sejam “varridos”. Uma vez formados os grupos, é resolvido um TSP para cada um deles de forma a definir as rotas. Esta técnica é uma das mais simples de compreender e implementar, no entanto é pouco flexível na adaptação a variantes do VRP (Cordeau *et al.*, 2002).

GAP. Fisher & Jaikumar (1981) apresentam também um algoritmo do tipo *cluster first - route second*. O primeiro passo é selecionar m clientes como sementes (“*seeds*”) e calcular o custo de afetar cada cliente a cada semente. O segundo passo é construir um grupo (“*cluster*”) para cada semente minimizando o custo total de afetação e tendo em conta as restrições de capacidade. Este passo corresponde à resolução de um Problema de Afetação Generalizado (GAP – “Generalised Assignment Problem”). Por último, é resolvido um TSP para cada grupo de forma a definir as rotas. Este algoritmo é interessante por poder ser adaptado e refinado com diferentes algoritmos desenvolvidos separadamente para cada uma das fases: selecionar as sementes, resolver o GAP, e resolver o TSP. O processo de seleção de sementes foi descrito e melhorado por Bramel & Simchi-Levi (1995) e Baker & Sheasby (1999).

3.3.3 Metaheurísticas

As metaheurísticas são essencialmente algoritmos de melhoria local que procuram encontrar melhores soluções mas, ao contrário das heurísticas clássicas, admitem degradar temporariamente a qualidade da solução para evitar ficar “preso” a ótimos locais. Exploram intensivamente as regiões mais promissoras do espaço de soluções e usam técnicas sofisticadas de pesquisa em vizinhanças, estruturas de memória e recombinação de soluções. A precisão e qualidade das soluções é geralmente muito melhor, mas com tempos de cálculo mais elevados (Cordeau *et al.*, 2002).

As metaheurísticas podem ser divididas em três classes (Laporte, 2009):

- **Pesquisa Local.** Essencialmente, exploram o espaço de soluções movimentando em cada iteração a solução atual para uma solução na sua vizinhança. Inclui métodos como a Pesquisa Tabu, Arrefecimento Simulado, Arrefecimento Determinístico e Pesquisa de Vizinhança.
- **Pesquisa Populacional.** Exploram um conjunto de soluções dinâmico, chamado a população, que podem ser alteradas e combinadas entre si. Inclui Algoritmos Genéticos e Procedimentos de Memória Adaptiva.
- **Mecanismos de Aprendizagem.** Atribuem pesos às características das soluções, e com a experiência e aprendizagem, ajustam iterativamente esses pesos conforme a qualidade das características. Incluem *Neural Networks* e Otimização por Colônias de Formigas.

Segue-se uma descrição genérica das metaheurísticas mais populares na literatura.

A metaheurística **GRASP** (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), desenvolvida por Feo, Resende & Smith (1994) e Feo & Resende (1995), é um procedimento iterativo utilizado em problemas de otimização combinatória. Cada iteração consiste em duas fases, Construção e Pesquisa Local. Na fase de Construção os elementos da solução são avaliados por uma função “gananciosa” e vão sendo adicionados aleatoriamente à solução a partir de um conjunto de melhores candidatos. A solução inicial gerada poderá ser não admissível e, nesse caso, é aplicado um procedimento para reparar a solução. Uma vez alcançada uma solução admissível, é iniciada a fase de Pesquisa Local, na qual a vizinhança é investigada até se encontrar um ótimo local. A natureza adaptativa do algoritmo é incorporada com um parâmetro de benefício associado a cada elemento que é atualizado em cada iteração. O algoritmo termina quando são concluídas o número de iterações especificadas inicialmente e o melhor dos ótimos locais encontrados em cada iteração é mantido como resultado. Resende & Ribeiro (2003) fazem uma descrição de técnicas e adaptações populares do GRASP.

A **Pesquisa Tabu** (TS – *Tabu Search*), introduzida por Glover (1986), utiliza mecanismos de pesquisa local para definir movimentos admissíveis na vizinhança de uma solução inicial. A melhor solução encontrada na vizinhança passa a ser a nova solução, mesmo que degrade a qualidade da solução anterior. Para impedir a ocorrência de ciclos, são implementados mecanismos que consistem em guardar os movimentos que originaram a solução atual numa lista Tabu, impedindo o uso de movimentos repetidos por um determinado número de iterações. Excepcionalmente, quando a solução constitui uma nova melhor solução entre todas as soluções conhecidas, o movimento Tabu será aceite. A lista Tabu é um mecanismo de memória utilizado para guiar a pesquisa no espaço de soluções, registrando o histórico de pesquisa e é o que a distingue dos outros métodos.

Alguns mecanismos foram desenvolvidos para melhorar a sua *performance*, como estratégias de intensificação e diversificação da pesquisa local (Rochat & Taillard, 1995) ou o princípio de granularidade de Toth & Vigo (2003). Na literatura existem ainda diversas aplicações (Osman, 1993; Taillard, 1993; Gendreau, Hertz & Laporte, 1994; Cordeau, Gendreau & Laporte, 1997; Rego, 1998), bem como descrições detalhadas dos mecanismos e funcionamento do TS (Glover and Laguna, 1998). A utilização da Pesquisa Tabu para o problema de rotas de veículos destaca-se relativamente a outras metaheurísticas. Cordeau *et al.* (2002) consideram mesmo que esta é a melhor técnica para a resolução do VRP e as suas variantes.

O **Arrefecimento Simulado** (SA – *Simulated Annealing*) foi proposto por Kirkpatrick, Gelatt & Vecchi (1983) e explora uma analogia com a termodinâmica ao simular o arrefecimento de átomos aquecidos. Tal como a Pesquisa Tabu, é um processo iterativo de busca de soluções no espaço vizinho, que admite degradar a solução. A admissão de movimentos que pioram a solução está relacionada com um parâmetro T, designado Temperatura, que mede a probabilidade de movimentos piores serem admitidos. A Temperatura diminui ao longo das iterações e o processo termina quando esta atinge um valor próximo ou igual a zero. Alguns dos trabalhos que implementam este método são os de Alfa, Heragu & Chen (1991), Osman (1993) e Breedam (1995).

Os **Algoritmos Genéticos** (GA – *Genetic Algorithms*) são métodos de base populacional introduzidos por Holland (1975) e baseiam-se nas leis genéticas e na Teoria da Seleção Natural. A partir de um conjunto de soluções chamado a População, são aplicados mecanismos que simulam a mutação e reprodução de indivíduos, com a combinação de características dos “progenitores”, de modo a fazer evoluir a população inicial. Assim é possível diversificar a população e manter as características mais interessantes a cada iteração. Algumas aplicações do algoritmo na literatura são as de Baker & Ayechev (2003), Ombuki, Ross & Hanshar (2006) Mostafa *et al.* (2017).

A **Otimização por Colônias de Formigas** (ACO – *Ant Colony Optimization*) foi inspirada no comportamento das colônias de formigas na sua busca por comida. As formigas libertam feromonas que, conforme a quantidade, indicam às outras a qualidade e distância da comida. Analogamente, a feromona será um parâmetro que mede a qualidade dos elementos da solução e, conseqüentemente, a probabilidade de serem utilizados na solução final. Assim, cada iteração consiste em três passos. Primeiro, a construção de uma solução aleatória cujos elementos (arcos e nós) com mais feromona terão maior probabilidade de serem usados. Segundo, a avaliação das soluções e atualização da feromona dos elementos. No terceiro passo são aplicadas operações de melhoria local e avaliação global como complemento adicional na avaliação dos elementos e atualização das feromonas. Também são contemplados mecanismos de “evaporação” de feromona que evitam que a solução estagne em ótimos locais. A título de exemplo, poderão consultar-se algumas aplicações bem sucedidas do conceito em Bullnheimer, Hartl & Strauss (1999), Matos & Oliveira (2004), Reimann, Doerner & Hartl (2004) e Yu, Yang & Yao (2009).

A **Pesquisa de Vizinhança** (NS – *Neighbourhood Search*) é um algoritmo que trabalha com uma lista de vizinhanças, cada uma contendo um conjunto de soluções. Geralmente começa com uma dada vizinhança e troca para a próxima vizinhança da lista sempre que descobre um ótimo local. Utiliza diversos mecanismos distintos tanto na fase de melhoria local como na de busca de novas vizinhanças prometedoras. É de notar que existem diversas variantes deste algoritmo, como a Pesquisa de Vizinhança Variável (VNS – *Variable Neighbourhood Search*) introduzida por Hansen & Mladenović (1997) e aplicada ao VRP por Kytöjoki *et al.* (2007), a Pesquisa de Vizinhança Variável Alargada (VLNS – *Very Large Neighbourhood Search*) que foi aplicada ao VRP por Ergun, Orlin & Steele-Feldman (2006) e ainda a Pesquisa de Vizinhança Adaptiva Alargada (ALNS – *Adaptive Large Neighbourhood Search*) com um estudo relevante por parte de Pisinger & Ropke (2007).

De acordo com Cordeau *et al.* (2002) as heurísticas devem ser avaliadas não só de acordo com velocidade e precisão, mas também simplicidade e flexibilidade. Nesta matéria, o TS com o princípio de granularidade (Toth and Vigo, 2003) ou com o conceito de memória adaptativa (Rochat and Taillard, 1995) podem ser facilmente adaptados a variantes do VRP. A maioria das metaheurísticas conseguem resultados consistentes (Cordeau *et al.*, 2005) e são aplicadas ao VRP muito mais frequentemente que os restantes métodos (Braekers, Ramaekers and Van Nieuwenhuyse, 2016). É de notar também que a maioria das técnicas usadas em casos reais são combinações entre os vários algoritmos em diferentes etapas de resolução dos problemas.

3.4 Variantes do VRP

Ao longo do tempo, têm surgido variantes do tradicional problema de rotas de veículos para acomodar diversas situações mais complexas dos problemas reais. Cada sistema tem características próprias, exigindo diferentes formas de abordagem. Um sistema pode incluir um ou vários depósitos, frota de veículos homogénea ou heterogénea, rotas abertas ou fechadas e procura determinística ou estocástica. Além disso, os clientes podem ter períodos de tempo para serem visitados ou requerer diversas visitas num determinado período de tempo. As variantes do VRP surgem com a adição de restrições ou níveis de decisão ao VRP clássico.

Eksioglu, Vural & Reisman (2009) apresentaram uma taxonomia robusta e suficiente para classificar uma grande diversidade de variantes do VRP de acordo com o tipo de estudo, características do cenário, características físicas do problema e características da informação e dos dados. Este trabalho foi complementado e atualizado mais tarde por Braekers, Ramaekers & Van Nieuwenhuyse (2016).

As variantes que melhor se aplicam às características do problema em estudo são o Problema de Rotas de Veículos Periódico (PVRP – *Periodic Vehicle Routing Problem*), quando os clientes a visitar têm frequências de visita diferentes e o Problema de Rotas de Veículos com Janelas Temporais (VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*) quando os clientes só podem ser visitados em certos períodos do dia. Uma vez que ambos os problemas são extensões do VRP, também pertencem à classe de problemas NP-difíceis e, por isso, a maior parte das técnicas desenvolvidas são procedimentos heurísticos derivados das técnicas utilizadas na resolução do VRP. Os métodos exatos acabam por ser utilizados apenas em problemas de instâncias triviais. Algumas heurísticas desenvolvidas para a sua resolução são brevemente descritas nas secções seguintes.

3.4.1 PVRP

O PVRP é uma generalização do VRP que surge quando os clientes têm frequências de visita diferentes durante um determinado horizonte temporal. Desta forma, os dias de recolha/entrega têm que ser afetados a cada cliente, e as rotas dos veículos têm que ser desenhadas para cada dia do horizonte temporal definido, de tal forma que o custo total de distribuição seja minimizado. Este problema acrescenta assim um novo nível de decisão ao VRP, relativo à periodicidade – a afetação de visitas aos clientes aos dias do horizonte temporal, isto é, a calendarização dessas visitas. A interação entre os aspetos temporais e espaciais do problema torna-o numa das variações mais complexas do VRP (Baptista, Oliveira & Zúquete, 2002).

Genericamente, o PVRP pode ser definido como o planeamento num horizonte temporal t , onde para cada cliente i há uma frequência de visita e_i e um conjunto C_i de opções de visita ao longo de t que corresponde às possíveis combinações de visita. O problema consiste em seleccionar

simultaneamente o padrão de visita de cada cliente e estabelecer as rotas para cada dia do horizonte temporal, de acordo com as restrições já definidas para o VRP.

Beltrami & Bodin (1974) são os primeiros a introduzir o PVRP e apresentam duas primeiras abordagens e a principal ideia chave para o resolver num caso de recolha de resíduos com duas opções de frequência de recolha. A ideia chave passa por criar uma réplica do cliente para cada opção de frequência, com a restrição adicional de que as réplicas não poderão ser alocadas na mesma rota. Numa primeira abordagem, as rotas são definidas primeiro, com base na Heurística das Poupanças (Clarke & Wright, 1964), e depois são afetadas aos possíveis padrões de recolha. A segunda abordagem consiste em afetar aleatoriamente os clientes aos padrões de recolha primeiro e, depois, desenhar as rotas com base nesta alocação. A afetação aleatória é realizada diversas vezes até se encontrar a melhor solução.

Russell & Igo (1979) estendem a análise anterior a problemas de maior dimensão e com quaisquer frequências, e popularizam a ideia da criação de cópias dos clientes. Por cada visita ao longo do horizonte temporal é criada uma réplica e, de seguida, os clientes geograficamente próximos e com a mesma frequência de visita semanal são agrupados, para reduzir o tamanho do problema. Os autores propõem três heurísticas para a resolução do PVRP. Na primeira, os clientes de visita diária são afetados a cada dia da semana e os restantes clientes são calendarizados com base na distância média entre os clientes de visita diária afetados na fase inicial e os novos clientes. Estes são inseridos por ordem decrescente de frequência semanal. A segunda heurística foi desenvolvida para reparar e melhorar a solução inicial através de mecanismos de trocas. E a terceira heurística usa os procedimentos de Clarke & Wright (1964), modificados para acomodar as restrições associadas ao PVRP, para desenhar as rotas.

Christofides & Beasley (1984) apresentam uma heurística que afeta os clientes aos dias de recolha e depois resolve um VRP para cada um dos dias. A afetação inicial é baseada numa ordem na qual os clientes com menos padrões de visita possíveis e maior procura são calendarizados primeiro. Os clientes são inseridos de acordo com o padrão admissível de menor custo total. É proposto um método de melhoria que considera trocas de clientes no calendário, mas esta abordagem resulta numa excessiva resolução de VRP diários, um por cada troca. Assim, para relaxar o problema, são utilizadas duas alternativas mais simples, a resolução de um TSP ou de um problema da p-mediana. Baptista, Oliveira & Zúquete (2002) apresentam uma extensão desta heurística adaptada e aplicada à recolha de contentores de papel reciclado no município de Almada, Portugal.

Tan & Beasley (1984) e Russell & Gribbin (1991) introduziram a Programação Linear Inteira (PLI) para desenvolver uma solução. Os primeiros elaboram uma adaptação da heurística GAP ao PVRP, utilizando PLI para definir a calendarização dos clientes e posteriormente um VRP para cada dia. Os segundos utilizam uma extensão do algoritmo de Christofides & Beasley (1984) ao qual acrescentam heurísticas adicionais de melhoria local.

Chao, Golden & Wasil (1995) visaram melhorar as heurísticas anteriores através de mecanismos de escape de ótimos locais. Utilizam PL durante a calendarização de clientes para gerar uma solução inicial que equilibra as quantidades recolhidas ao longo do horizonte temporal. Depois aplicaram heurísticas de melhoria local com diferentes mecanismos de trocas e relaxam a restrição de capacidade para aumentar a flexibilidade dos movimentos.

Cordeau, Gendreau & Laporte (1997) apresentaram pela primeira vez uma metaheurística baseada na Pesquisa Tabu para a resolução do PVRP, TSP periódico (PTSP – *Periodic TSP*) e VRP Multi-Depósito (MDVRP – *Multi Depot VRP*), bastante popular pela sua capacidade de adaptação a outras variantes e extensões do PVRP. O algoritmo começa por criar uma solução inicial, na qual os clientes são afetados aleatoriamente a possíveis combinação de visita, de acordo com uma ordem particular, e incluídos nas rotas diárias usando heurísticas de inserção. A vizinhança da solução é explorada de forma iterativa com trocas de clientes entre rotas do mesmo dia ou alterações na afetação dos clientes aos padrões de visita. Cordeau, Laporte & Mercier (2001) modificam e adaptam esta aplicação ao PVRP com janelas temporais (PVRPTW – *PVRP with Time Windows*) e Cordeau & Maischberger (2012) melhoram o seu poder computacional com alterações nos movimentos de pesquisa local.

Hemmelmayr, Doerner & Hartl (2009) desenvolvem uma metaheurística baseada no VNS aplicada ao PVRP, procurando soluções numa dada vizinhança e mudando de vizinhança sempre que é encontrado um ótimo local. Pirkwieser & Raidl (2010) estendem esta aplicação utilizando estratégias de refinamento multinível, isto é, simplificar e resolver o problema em cada nível de decisão e depois estender a solução simplificada ao problema original.

Drummond, Ochi & Vianna (2001) apresentam um algoritmo evolucionário híbrido onde recorrem ao conceito de algoritmos genéticos paralelos. Vidal *et al.* (2012) melhoram o processo com o aumento da diversidade de genes da população combinado com processos de melhoria local.

Nota ainda para Matos & Oliveira (2004) que introduziram uma metaheurística ACO, na qual os nós são replicados para representar o número requerido de visitas ao longo do horizonte temporal e Goncalves, Ochi & Martins (2005) que desenvolveram uma metaheurística GRASP competitiva com os métodos mais populares.

Estes problemas têm aplicabilidade em diversas áreas como a recolha de resíduos (Beltrami & Bodin, 1974; Teixeira, Antunes & De Sousa, 2004), distribuição de produtos alimentares (Carter *et al.*, 1996), alocação de força de trabalho (Jang *et al.*, 2006), entre outras aplicações. Existem também algumas extensões do PVRP, as quais poderão ser consultadas, tal como as suas aplicações, na revisão de Campbell & Wilson (2014).

3.4.2 VRPTW

O VRPTW é mais uma extensão do VRP, e que surge quando os clientes só podem ser visitados em certos períodos do dia. Assim, este problema acrescenta ao VRP restrições que dizem respeito às janelas temporais dos clientes. Genericamente, pode ser definido como o planeamento de rotas onde, para cada cliente i há uma janela de tempo $[a_i, b_i]$, na qual o cliente pode ser servido. É permitido ao veículo chegar antes de a_i e esperar até que o cliente se torne disponível para o servir. Tipicamente, em revisões do VRPTW, os métodos heurísticos são classificados em métodos construtivos, métodos de melhoria local e metaheurísticas (Bräysy & Gendreau, 2005a, 2005b; El-Sherbeny, 2010).

Na classe dos métodos construtivos, Solomon (1987) propôs uma série de heurísticas de inserção para o VRPTW essencialmente baseadas no Método das Poupanças de Clarke & Wright (1964). Entre elas, a mais eficiente é chamada I1. Começa por escolher o cliente mais afastado do depósito como semente, e em cada iteração é selecionado o cliente que maximiza as “poupanças” e é inserido na posição que minimiza uma combinação entre a distância extra e o tempo de espera para começar o serviço. Sempre que a capacidade de um veículo é excedida, é iniciada uma nova rota e o processo repete-se até que todos os clientes sejam servidos. Potvin & Rousseau (1993) desenvolveram uma versão paralela deste método, na qual as rotas são construídas em simultâneo e o critério de seleção reflete o custo do cliente não ser inserido na melhor rota. Ioannou, Kritikos & Prastacos (2001) propõem novas melhorias a este algoritmo com a modificação dos critérios de seleção e inserção para que tenham em conta o impacto global de cada cliente.

Os primeiros métodos de melhoria local para o VRPTW (Russell, 1977; Baker & Schaffer, 1986) são adaptações dos mecanismos introduzidos inicialmente para o TSP e VRP. Por causa das restrições associadas às janelas temporais, verificar a admissibilidade das novas soluções pode consumir muito tempo computacional, o que motivou Savelsbergh (1985, 1990, 1992) e Solomon & Desrosiers (1988) a melhorar a eficiência desse processo. Potvin & Rousseau (1995) adaptaram um mecanismo de trocas de arcos entre rotas para que mantenham a mesma orientação. Por sua vez, Thompson & Psaraftis (1993) desenvolveram o conceito de permutação circular de k clientes entre b rotas e aplicaram-no ao VRPTW. Em alguns casos, foram incorporados mecanismos de melhoria local durante os processos de construção, como no trabalho de Russell (1995) e Antes & Derigs (1995). Para escapar de ótimos locais, Cordone & Calvo (2001) apresentam uma heurística que, ao construir uma solução através do I1 de Solomon (1987) e aplicar procedimentos de melhoria local, alterna entre duas funções objectivo, minimizar a distância total ou a duração total da rota. Bräysy (2002) apresenta uma abordagem em três fases: a primeira consiste em criar um conjunto de soluções iniciais variando os parâmetros da função objectivo, a segunda aplica operadores de pesquisa local para reduzir o número de rotas, e a terceira aplica procedimentos de trocas entre rotas para reduzir o custo total do planeamento.

Relativamente às metaheurísticas, uma vez que são desenvolvidas para problemas combinatórios no geral, estão preparadas para incorporar as modificações e restrições necessárias de adaptação ao VRPTW. Existem na literatura extensas revisões de aplicações de metaheurísticas ao VRPTW (Bräysy & Gendreau, 2002, 2005b; El-Sherbeny, 2010).

Naturalmente, o TS é uma das metaheurísticas mais populares, com Garcia, Potvin & Rousseau (1994) a produzirem a primeira adaptação, seguidos por Badeau *et al.* (1997), Chiang & Russell (1997), Schulze & Fahle (1999), Cordeau, Laporte & Mercier (2001), entre outros. Na sua maioria, os autores utilizam o algoritmo I1 de Solomon (1987) para a construção da solução inicial ou em alguns casos a modificação de Russell (1995) e durante a fase de pesquisa de vizinhança são utilizados os diversos algoritmos de melhoria local disponíveis.

Os GA também são bastante populares na resolução do VRPTW. As implementações de maior sucesso na literatura são as de Homberger & Gehring (1999) e Gehring & Homberger (2002). No primeiro trabalho foram desenvolvidas duas abordagens com estratégias de evolução distintas. No segundo trabalho foi desenvolvida uma estratégia de paralelização, isto é, com diferentes processos de pesquisa local envolvidas no processo de busca ao mesmo tempo. Homberger & Gehring (2005) introduziram alguns melhoramentos a estes dois algoritmos e combinaram-no com o TS para obter melhores resultados. Berger, Barkaoui & Bräysy (2003) também desenvolveram um GA que evolui duas populações distintas com diferentes objetivos.

Para além destas duas, foram desenvolvidas mais algumas metaheurísticas que também obtiveram bons resultados computacionais. Kontoravdis & Bard (1995) desenvolveram um GRASP, Gambardella, Taillard & Agazzi (1999) um ACO, e Bräysy (2003) uma modificação do VNS ajustada ao VRPTW.

Existem inúmeras aplicações do problema a situações reais, por exemplo, a recolha de resíduos, entrega postal, distribuição de produtos em restaurantes, entregas em bancos e planeamento de rotas de autocarros escolares (El-Sherbeny, 2010).

Capítulo 4 – Método de Abordagem e Modelos Utilizados

Este capítulo é iniciado com algumas notas acerca da complexidade do problema, bem como das implicações que isso terá na forma como o modelo é elaborado. Um aspeto fundamental do problema, que de certa forma é qualitativo e, conseqüentemente, difícil de mensurar, é a inserção dos novos circuitos com o mínimo de perturbações no Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) de Lisboa.

De seguida são apresentados os objetivos e as restrições envolvidas no problema, que levam a uma abordagem pouco convencional, na qual o problema é repartido em três cenários.

Por fim, são apresentados os diversos módulos dos modelos utilizados e a conjugação final desses módulos numa abordagem integradora capaz de produzir as soluções pretendidas.

4.1 Considerações Gerais

De uma forma trivial, e alheando o problema da integração com o SGRU de Lisboa, o estudo em análise é um problema de estabelecimento de rotas de veículos (VRP – *Vehicle Routing Problem*), com restrições de capacidade e tempo. A periodicidade está relacionada com diferentes frequências de recolha dependendo do tipo e quantidade de resíduos a recolher e, uma vez que existem dois fluxos de carga distintos, estes serão transportados para diferentes estações de tratamento e valorização, conferindo-lhe também uma particularidade especial.

Desta simples definição, podemos concluir que existem duas dimensões de decisão inerentes ao problema – a periodicidade de recolha e a configuração de rotas –, e ainda três restrições primordiais – uma ligada às capacidades de carga dos veículos, outra ligada à duração máxima do circuito, e por fim, uma restrição relacionada com o fluxo de resíduos a recolher.

No entanto, a dificuldade está nos detalhes, e o SGRU de Lisboa é um sistema de grandes dimensões, muito complexo e heterogéneo, e em constante adaptação ao crescimento da cidade. É uma estrutura que coordena diversas operações adaptadas a cada zona da cidade, em certos casos até a pontos de recolha específicos, e onde existem diversos materiais valorizáveis a recolher. Assim, a introdução dos novos circuitos de RO no sistema atual adiciona, algumas dimensões de decisão externas ao VRP que devem ser identificadas.

No domínio estratégico, é necessário definir a área de influência do projeto piloto, isto é, analisar quais são as zonas geográficas com maior aptidão para a instalação de novos fluxos, ao nível das infraestruturas e comportamentos esperados das populações servidas, e selecionar os locais de recolha específicos onde serão instalados os novos contentores para a deposição e recolha de RO.

No domínio tático, e em reciprocidade com a definição da área de influência, é necessário definir como e com qual das operações já implementadas o projeto piloto deverá ser articulado. Sendo que uma operação envolve diferentes tipos de veículos, contentores, fluxos de resíduo, calendários, e outras restrições, é necessário entender em qual delas a recolha de RO se adapta melhor, sem comprometer o bom funcionamento do sistema. Sendo que cada circuito é executado por uma operação, também deverá ser tido em conta quais os circuitos envolvidos.

Por exemplo, numa fase inicial, especulou-se selecionar um conjunto de PR inseridos nas freguesias de São Domingos de Benfica, Carnide e Telheiras. No entanto, os circuitos abrangidos, apesar de operarem de forma similar, eram realizados em horários diferentes entre si, o que inviabilizou a seleção dessa zona geográfica para a implementação do projeto piloto.

Os diversos níveis de decisão, e a forma como se interrelacionam entre si, tornam o problema extremamente complexo para que seja modelado e resolvido com simples técnicas heurísticas ou de programação matemática. De forma a lidar com estas dificuldades, as decisões do domínio estratégico e tático serão limitadas a três cenários distintos desenvolvidos e propostos em conjunto com a CML, e que serão descritos nas próximas secções.

De notar também que o objetivo principal do modelo não é melhorar o SGRU de Lisboa como um todo, e tão pouco otimizar isoladamente o futuro circuito de recolha de orgânicos. Passa sim por minimizar o impacto da introdução desse mesmo circuito no sistema, isto é, minimizar os custos do circuito em si, bem como os custos das alterações necessárias ao acoplamento do circuito no sistema, sem comprometer o seu bom funcionamento.

O objetivo primordial culmina, então, na análise de ambas as alternativas, tendo em conta o fator económico – refletido nos custos operacionais ligados às distâncias percorridas em cada uma delas –, e o fator organizacional – que se reflete na dificuldade de implementação de cada um dos cenários propostos, de forma a oferecer algumas soluções para o problema.

4.2 Cenários de Análise

Face às dificuldades decorrentes dos diversos níveis de decisão envolvidos, as decisões de carácter estratégico e tático foram tomadas de forma pragmática pelo decisor (CML), tendo em conta a experiência e conhecimento dos seus colaboradores.

Ao nível estratégico, foi definida uma área geográfica, na zona da Alta de Lisboa (freguesias do Lumiar e Santa Clara), que englobam, na sua generalidade, prédios de grande porte com as infraestruturas necessárias à instalação de novos contentores para armazenar RO. No total, esta área envolve 72 pontos de recolha. Por uma questão de simplicidade, este conjunto de pontos será por vezes referido como zona do projeto piloto, projeto piloto ou apenas PP.

A zona do projeto piloto engloba pontos de recolha alocados a quatro circuitos de recolha seletiva de resíduos indiferenciados atualmente em vigor e que operam nas zonas do Lumiar, Santa Clara e Alvalade. A Tabela 5 resume o número de pontos de recolha (PR) afeto a cada circuito atual, o número de pontos de recolha incluídos na zona do projeto piloto (PR PP) e ainda o calendário de periodicidade de recolha de cada um desses circuitos de indiferenciados. Por uma questão de simplicidade, os circuitos são identificados pelo mesmo código que a CML utiliza. A introdução do projeto piloto no SGRU de Lisboa implicará alterações nos quatro circuitos indicados.

| Circuito | Nº de PR | Nº de PR PP | Periodicidade |
|--------------|------------|-------------|---------------|
| I0802MF | 80 | 27 | 3ª, 5ª e Sáb |
| I0806 | 77 | 39 | 2ª, 4ª e 6ª |
| I0809 | 113 | 1 | 3ª, 5ª e Sáb |
| I0805 | 79 | 5 | 2ª, 4ª e 6ª |
| Total | 349 | 72 | |

Tabela 5 - Circuitos de PaP Seletiva no Sector Doméstico afetados

As alterações nos circuitos afetados e nos pontos de recolha da zona do projeto piloto são decisões de dimensão tática e envolvem a forma como a zona definida vai operar e intercalar com estes circuitos. Incluem a definição das operações, horários e frequências de realização (calendário) a realizar nessa zona. O número de formas de intercalar a introdução do circuito piloto com o sistema atual fica restringido a algumas alternativas, das quais três serão selecionadas e analisadas neste estudo, formando aquilo a que chamaremos de cenários de análise.

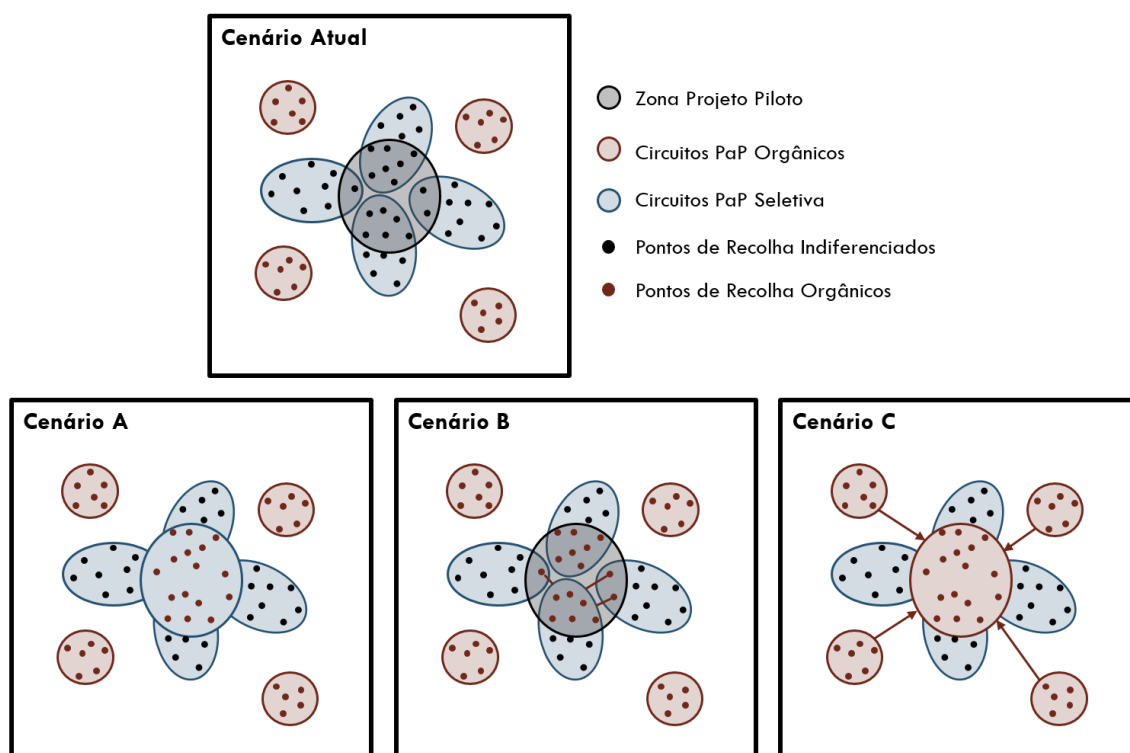


Figura 4 - Representação dos Cenários de Análise

Na Figura 4 estão representados os três cenários de análise no caso de estudo e o impacto que cada um deles terá no sistema e na configuração dos circuitos.

O Cenário A – Reconfiguração dos Circuitos, consiste na articulação da zona do projeto piloto com a operação PaP de recolha seletiva no sector doméstico. Neste cenário, será configurado um circuito somente para os pontos de recolha selecionados, que se identifica como o circuito piloto. Os restantes pontos de recolha serão reconfigurados em conformidade com o circuito piloto. Os dois circuitos de indiferenciados mais desfalcados serão fundidos e os outros dois sofrerão ligeiras alterações com a alteração de alguns pontos de recolha.

O Cenário B – Circuitos Mistos, também consiste na articulação da zona do projeto piloto com a operação PaP de recolha seletiva no sector doméstico. Os circuitos sofrerão alterações mínimas nas suas configurações, isto é, apenas as estritamente necessárias para incluir todos os pontos de recolha selecionados no mínimo número de circuitos. Os circuitos que incluem tantos pontos de recolha de orgânicos como pontos de recolha de indiferenciados serão chamados de circuitos mistos. Uma vez que as viaturas não possuem a capacidade de transportar diferentes materiais ao mesmo tempo, uma vez que não são multicompartimentadas, os circuitos mistos terão que realizar um mínimo de dois fretes, um para cada tipo de resíduo. A viatura terá que ser descarregada antes de começar a recolher o segundo tipo de resíduo.

O Cenário C – Circuitos Orgânicos em Entidades, traduz-se na articulação da zona do projeto piloto com a operação PaP de orgânicos em entidades. Os circuitos que recolhem orgânicos em entidades serão reconfigurados de forma a incluir nos seus percursos a recolha de orgânicos em residências. Esta situação implica a integração de duas operações distintas. Os pontos de recolha selecionados, por estarem associados a residências, possuem características da operação PaP seletiva no sector doméstico, como por exemplo, um calendário de recolha pré-definido que implica uma periodicidade diferente da operação PaP de orgânicos em entidades.

Estes circuitos não são diretamente afetados pela seleção de pontos de recolha, pois recolhem em entidades e não em residências. No entanto, uma vez que partilham o mesmo fluxo de resíduos, constituem uma oportunidade de aproveitamento dos recursos disponibilizados para os circuitos que realizam a recolha com a operação PaP de orgânicos em entidades.

Para cada um dos cenários, serão construídas rotas para circuito e as frequências de recolha serão alteradas em conformidade com a situação de cada cenário de análise.

4.3 Objetivos e Restrições

O objetivo último da CML, promovido pelas medidas europeias e pelo PERSU, é a recolha de 4000 toneladas anuais extra de resíduos orgânicos. Para alcançar esta meta, a CML pretende implementar um circuito inédito de recolha de resíduos orgânicos no sector doméstico e integrá-lo com as restantes operações do SGRU de Lisboa.

Nos modelos propostos, o principal objetivo é a minimização da distância total diária percorrida por todos os circuitos em cada um dos cenários, de forma a comparar o verdadeiro potencial de cada um deles. A distância é um indicador-chave de desempenho para cada um dos cenários propostos e assume assim uma importância preponderante, pois permite uma comparação entre cada um deles.

Como as decisões de nível estratégico foram tomadas antes da elaboração do modelo, as de nível tático foram limitadas a três alternativas, isto é, aos cenários propostos. Podemos então decompor o objetivo do modelo em duas dimensões:

- Na dimensão tática, pretende-se obter uma visão daquilo que poderá ser cada um dos cenários após uma eventual implementação;
- Na dimensão operacional, o modelo têm como objetivo a construção de rotas para cada um dos circuitos, tendo em conta a minimização da distância total percorrida.

Ambas as dimensões estão relacionadas entre si na medida em que uma implica a outra. Isto é, para se poder prever e comparar os cenários propostos, é necessário criar um bom indicador de *performance*, surgindo assim o objetivo de minimizar as distâncias percorridas em cada circuito.

Os objetivos assumidos no modelo de análise têm também em conta o fator organizacional e o fator económico. O primeiro está ligado com a dificuldade de implementação do novo circuito no sistema, isto é, à forma como será encadeado com as operações, calendários e horários em vigor e ainda os recursos envolvidos nessa reestruturação. O segundo reflete-se nos custos operacionais do sistema, que estão associados essencialmente à manutenção dos veículos e o combustível utilizado durante a realização dos circuitos. A distância percorrida está relacionada tanto com o combustível utilizado como com a frequência de manutenção do veículo e, por isso, é considerada um fator determinante dos custos operacionais.

Embora se tenham em conta os dois fatores enunciados, o fator organizacional está limitado aos três cenários oferecidos e, para além disso, é de difícil mensuração, uma vez que as opiniões dos colaboradores da CML divergem entre si quanto às vantagens e desvantagens de cada uma das propostas de implementação do projeto piloto. Este fator assume assim uma importância menor, limitando-se a algumas observações finais de carácter qualitativo. Poder-se-á imputar alguns custos fixos de implementação conforme as alternativas e as soluções encontradas.

Por sua vez, o fator económico terá maior relevância, pois pode ser medido através das distâncias percorridas em cada circuito e utilizado como indicador chave de performance na previsão e comparação de cenários.

As restrições do problema, na sua maioria, estão relacionadas com a intercalação do circuito piloto com o sistema em vigor e são de carácter estratégico e tático. Englobam decisões como a definição dos circuitos, operações de recolha a realizar, definição de horários e calendários de recolha, entre outras. Ao dividir o problema em cenários, essas restrições foram tidas em conta, permitindo conceber um modelo mais simples que não precise de as ter em consideração.

Tipicamente, nos problemas de PVRP, o número de veículos e a periodicidade de recolha são variáveis de decisão. Contudo, neste caso, as restrições impostas pela introdução dos pontos de recolha orgânicos no SGRU não permitem a alteração do número de veículos utilizados, que vai corresponder ao número de circuitos a reconfigurar em cada cenário. Por sua vez, a periodicidade será alterada e definida para cada circuito em conformidade com o cenário analisado. Assim, tanto o número de veículos como a periodicidade tornam-se num dado que deverá ser considerado nos modelos.

Para a definição das rotas de recolha existem duas restrições fundamentais a ter em conta:

- A duração máxima da rota, determinada pelo tempo útil de um turno de trabalho.
- A capacidade máxima do frete, em peso, determinada pela capacidade máxima do veículo que o realiza.

A capacidade máxima dos veículos limita a realização de um frete, mas não necessariamente a realização do circuito. Os PR estão geograficamente perto uns dos outros e as produções em alguns pontos de recolha poderão ser elevadas, por servirem zonas com alta densidade populacional. Assim, é previsível que os veículos atinjam a sua capacidade máxima muito antes do fim do turno de trabalho. Nesse caso, será considerada a realização de fretes de descarga sempre que a capacidade máxima do veículo seja alcançada.

Enquanto a restrição de capacidade implica a realização de um frete de descarga, a limitação de tempo inviabiliza a realização do circuito. Nesse caso, poderão ser sugeridas algumas alterações na estrutura dos circuitos. No entanto, não é desejável que isso aconteça, podendo mesmo inviabilizar também o cenário em causa.

De notar também que existem algumas restrições ao nível operacional. Vias demasiado estreitas para a circulação das viaturas de recolha, feriados que impedem a realização dos circuitos em certos dias, ou eventos que aumentam exponencialmente a produção de resíduos em alguns locais de recolha. Estes são apenas alguns exemplos de situações que poderão causar distúrbios nas operações previstas. Porém, nenhuma destas situações será considerada na conceção do modelo de análise, uma vez que não são consideradas no âmbito do estudo.

4.4 Abordagem ao Problema

A abordagem utilizada no desenvolvimento deste modelo parte do desacoplamento das heurísticas conhecidas e estudadas na revisão da literatura em módulos mais simples, para que se possam acomodar facilmente aos cenários propostos.

Neste estudo, o problema é dividido em cenários com *nuances* ligeiramente diferentes entre si ao nível das restrições. A complexidade do problema implica a utilização de um algoritmo simples e flexível para que se possa adaptar facilmente às restrições de cada cenário.

Pela revisão da literatura, os algoritmos desenvolvidos para problemas de gestão de resíduos raramente têm a simplicidade e flexibilidade necessária para se adaptarem a diversas situações complexas da realidade, como as do caso em estudo. Existe, por isso, a necessidade de desenvolver uma heurística simples, que se possa adaptar facilmente aos cenários propostos.

A abordagem utilizada consiste então no desenvolvimento de uma heurística dividida em módulos. Cada módulo é baseado em ideias simples, para que possa ser flexível e capaz de se adaptar às restrições existentes sem grandes complicações. No final, esses módulos podem ser acoplados num algoritmo final para cada cenário, sem comprometer demasiado os resultados obtidos.

Esta abordagem tem a vantagem de simplificar um problema complexo e de ser adaptável a situações distintas. A qualidade da solução pode não ser tão boa como numa abordagem integrada, no entanto, a precisão não é um fator relevante no desenvolvimento do modelo, pois o principal objetivo do problema é a comparação dos cenários. Assim, a solução não precisa de ser ótima, desde que a perda de qualidade seja semelhante nos três algoritmos finais.

Neste estudo pretende-se conceber uma solução que proporcione ao decisor uma clara noção dos custos operacionais futuros de cada um dos cenários de análise, ligados essencialmente à distância total percorrida e ao tempo despendido. As implicações ao nível organizacional de cada um dos cenários também deverão ser evidenciados, embora com menor destaque, visto que são de natureza qualitativa e, portanto, difíceis de mensurar.

Assim a solução deverá ser estática para que se possa efetuar uma comparação simples e realista de cenários. A solução não é única e nenhum dos cenários será sugerida como a melhor solução do problema. Serão apresentadas as avaliações necessárias, incluindo as vantagens e desvantagens identificadas em cada um dos cenários propostos (em todas as dimensões de decisão) para que o decisor possa comparar ambas as alternativas e escolher qual dos cenários propostos é o melhor.

Para avaliar cada um dos cenários, serão reconfigurados os circuitos e projetadas rotas diárias para cada um deles. Nos Cenários A e B os circuitos recolhem resíduos orgânicos ou resíduos indiferenciados segundo um calendário proposto pela CML que define a frequência de recolha. Quanto ao Cenário C, embora os circuitos PaP de orgânicos em entidades sejam realizados todos os dias à exceção de domingo, os circuitos de orgânicos reconfigurados resultantes da aplicação da metodologia serão realizados somente nos dias referenciados no calendário proposto.

Embora as rotas tenham sido calculadas com o principal propósito de calcular os custos operacionais, também elas foram individualmente minimizadas para perceber o potencial de cada uma das alternativas e, portanto, serão sugeridas como rotas modelo a realizar diariamente.

Assim, a solução pretendida para o problema de recolha de resíduos apresentado neste estudo consiste num plano para cada um dos cenários apresentado que engloba a configuração dos circuitos alterados, um percurso para cada um deles, uma avaliação aos custos operacionais de cada um dos circuitos, e ainda um resumo do impacto que cada um dos cenários poderá ter no Sistema de Gestão de Resíduos de Lisboa. Será dado especial destaque ao circuito ou circuitos que efetivamente incluirão os pontos de recolha de orgânicos.

Conforme os cenários apresentados, a avaliação dos custos operacionais deverá apresentar as seguintes informações, estimadas de acordo com o modelo desenvolvido: quantidade de resíduos orgânicos que se espera recolher, distância de ligação que se espera atingir e o tempo total da realização do circuito.

Será apresentada uma solução para cada um dos cenários analisados. Essas soluções serão avaliadas e comparadas entre si, para que possamos tecer alguns comentários de vantagens e desvantagens entre cada uma delas.

4.5 O Algoritmo Proposto

Nesta secção serão apresentados os vários módulos e a forma como se intercalam para produzir e propor um algoritmo final para cada um dos cenários de análise.

Os módulos são desenvolvidos e programados em R versão 3.6.1 (R Core Team, 2019), uma linguagem de programação especializada em manipulação, análise e visualização gráfica de dados. Esta linguagem é expansível através de bibliotecas disponíveis *online* que aumentam o seu conjunto de funcionalidades. A biblioteca “TSP”, desenvolvida por Michael Hahsler & Kurt Hornik (2019), foi extensivamente usada para a construção de rotas.

Existem dois módulos principais, que são essenciais na construção de rotas para os circuitos. Os restantes módulos são secundários e servem de apoio, seja no cálculo de dados dependentes de parâmetros, na avaliação das rotas produzidas ou na seleção e alocação de pontos de recolha aos circuitos de orgânicos. Todos os módulos serão descritos de seguida.

4.5.1 Módulos de Construção de Circuitos

Os módulos de construção de circuitos são os principais módulos da heurística proposta neste estudo. São comuns a todos os cenários e produzem as rotas que no final serão sugeridas e consideradas na comparação de cenários.

Nestes dois módulos o objetivo é a construção de rotas para um dado circuito, sem ter em conta as restrições de capacidade e tempo. Estamos, por isso, perante um TSP. Tipicamente a solução destes problemas é um ciclo hamiltoniano, ou circuito fechado. Depois de resolvido, o ponto de partida e chegada é selecionado e a rota é estabelecida.

No entanto, no problema em estudo, embora o ponto de partida e chegada seja a garagem, existem dois aspetos que dificultam a utilização desta abordagem:

- Antes do retorno à garagem, a carga terá que ser despejada na respetiva estação de tratamento de resíduos, implicando que esse seja o penúltimo ponto de visita no circuito e que a distância entre esse ponto e a garagem seja sempre percorrida.
- A frequente necessidade de realização de fretes de descarga implica visitas extraordinárias às estações de tratamento para repor a capacidade do veículo.

Para fazer face a estas dificuldades, a construção de rotas foi projetada em duas fases sequenciais, o Módulo Construção e o Módulo Metamorfose. Esta abordagem permite ter em conta as referidas dificuldades e ganhar flexibilidade para a adaptação das rotas ao resíduo que vai ser recolhido quando forem calculados e inseridos os fretes de descarga no circuito.

Módulo Construção

O módulo Construção constrói um ciclo hamiltoniano, ou circuito fechado, somente para os pontos de recolha de um circuito. Não tem ainda em consideração a garagem e a estação de tratamento do respetivo resíduo no circuito. Também não são consideradas as cargas recolhidas, e conseqüentemente não são incluídos no ciclo quaisquer fretes de descarga.

Os dados necessários para este módulo são uma matriz assimétrica de distâncias entre todos os pontos de recolha do circuito e uma base de dados com a identificação e características de cada PR. Deve ser também indicado o parâmetro que indica o número de iterações na busca de soluções. A variação deste parâmetro poderá influenciar a qualidade da solução. Quanto maior o número de iterações, maior a probabilidade de se encontrar um circuito fechado mais curto e próximo da solução ótima.

A biblioteca “TSP” disponibiliza diferentes métodos para a resolução do TSP. Na concepção deste módulo, foram selecionados aqueles que produzem melhores resultados:

- Inserção mais próxima;
- Inserção arbitrária;
- Inserção de menor custo;
- Inserção mais distante;
- Inserção mais distante com procedimento 2-Opt;

Numa primeira fase, cada um destes métodos é utilizado para produzir um ciclo fechado para o circuito, totalizando cinco soluções por iteração. As soluções são armazenadas numa lista e o processo é repetido até chegar ao número de iterações desejado. É avaliada a distância total percorrida de todos os ciclos da lista final e a melhor solução é selecionada e devolvida.

O resultado final deste módulo é a solução de um TSP, isto é, um circuito fechado, que inclui todos os pontos de recolha que lhe foram imputados. A sua representação está ilustrada no esquema da Figura 5.

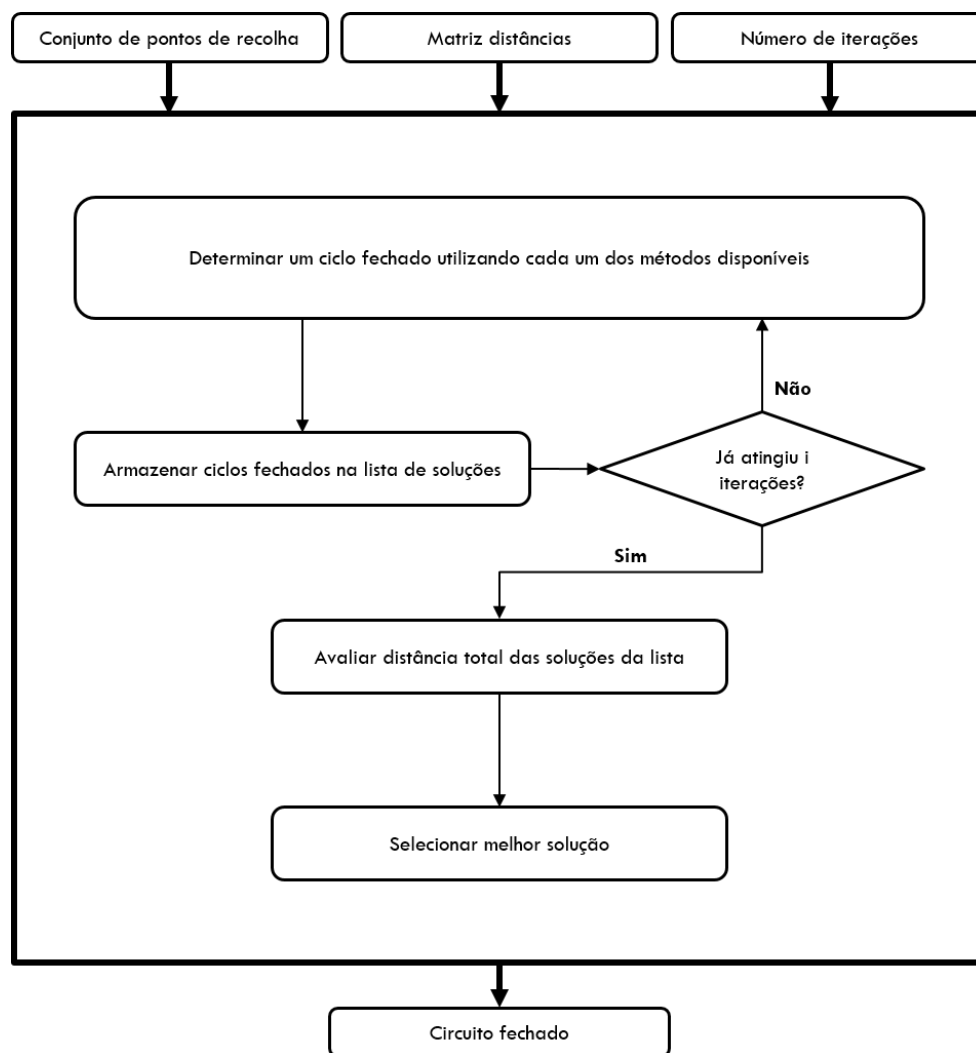


Figura 5 - Esquema simplificado do Módulo Construção

Módulo Metamorfose

O Módulo Metamorfose transforma o circuito fechado produzido no módulo anterior num circuito completo que inclui a viagem entre a garagem e o primeiro PR, a viagem final entre a estação de tratamento e a garagem, e ainda os fretes de descarga necessários ao circuito. Os dados necessários para este módulo são um circuito fechado, uma matriz assimétrica com as distâncias entre os PR e o depósito e entre PR e estações de tratamento (ETVO e CTRSU), o tipo de resíduos a recolher e a capacidade máxima no veículo para esse tipo de resíduo, e ainda uma estimativa da quantidade de resíduos produzidos por ponto de recolha.

A primeira etapa deste módulo é a seleção do primeiro local a visitar dentro do circuito fechado. Serão utilizados dois critérios distintos para a resolução desta fase. O primeiro é o critério de proximidade, baseado em ideias da heurística do vizinho mais próximo (*Nearest Neighbourhood*). Neste caso é selecionado o PR mais próximo da garagem como primeiro ponto a visitar. O segundo é o critério de poupança que consiste na eliminação do arco que concede a maior poupança ao circuito. Esta abordagem é baseada no conceito de poupança (*Savings*) de Clarke & Wright (1964). Uma vez que o custo dos circuitos é a distância percorrida, e que os arcos inseridos são sempre os mesmos, isto é equivalente a escolher a maior distância do circuito.

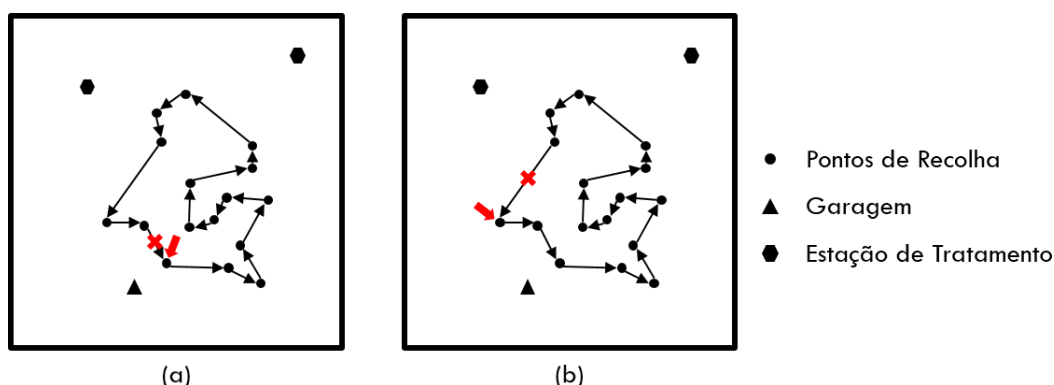


Figura 6 - Ilustração do critério de proximidade (a) e critério de poupança (b)

Esta resolução desencadeia duas consequências automáticas:

- A primeira é a definição da ordem do percurso. Sabendo qual é o primeiro PR a visitar no circuito, sabemos qual é o percurso a realizar desde o primeiro até ao último PR;
- A segunda é a eliminação da ligação entre o último e o primeiro PR. Este arco será futuramente substituído pelas ligações entre a garagem e o primeiro PR e ainda entre o último ponto de recolha e estação de tratamento do tipo de resíduo a recolher.

Na segunda etapa, são aplicadas as consequências da primeira fase, ilustradas na Figura 6. O arco que liga o último ponto ao primeiro é eliminado (a). É inserida a ligação entre a garagem e o ponto selecionado (b). Se for um circuito de orgânicos, o último ponto é conectado à ETVO, e se for de indiferenciados, à CTRSU (c). Por último, é acrescentada a ligação entre a respetiva central de tratamento de resíduos e a garagem (d).

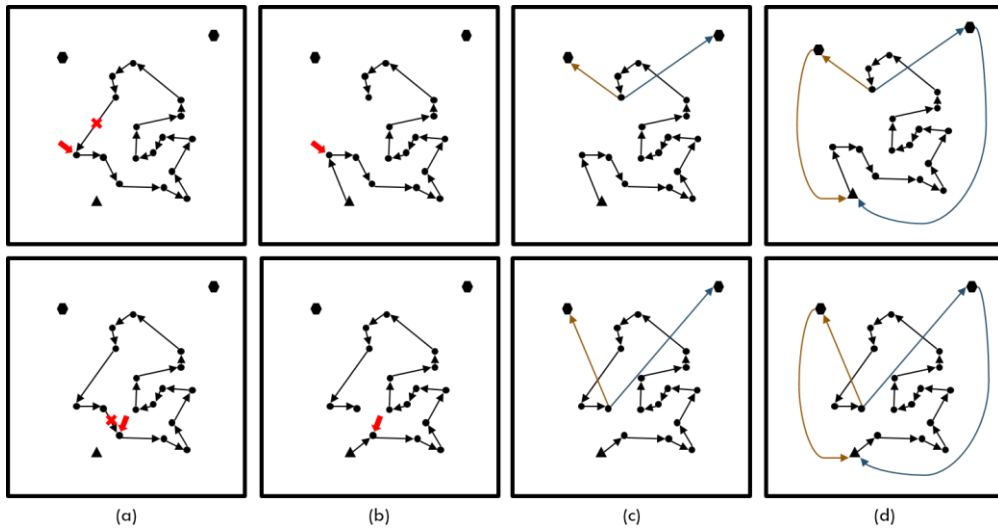


Figura 7 - Ilustração da segunda etapa com a utilização dos dois critérios de seleção

Como pode ver na Figura 7, as soluções resultantes dos dois critérios de seleção depois desta etapa são distintas. Note-se que, quando o conjunto de PR a ser trabalhado nos módulos de construção é o mesmo, o critério de proximidade irá selecionar sempre o mesmo PR. Pelo contrário, quando o critério de poupança é utilizado, a escolha depende do maior arco, que por sua vez, depende do circuito fechado produzido. O circuito fechado será sempre distinto, pois os algoritmos utilizados no módulo da sua construção utilizam processos de natureza aleatória. Isto terá implicações nos passos que se seguem, na medida em que, com a possível introdução de fretes de descarga, não é possível prever qual dos critérios originará a melhor solução. Para lidar com esta situação, ambos os critérios são utilizados e as próximas etapas são aplicadas a ambos.

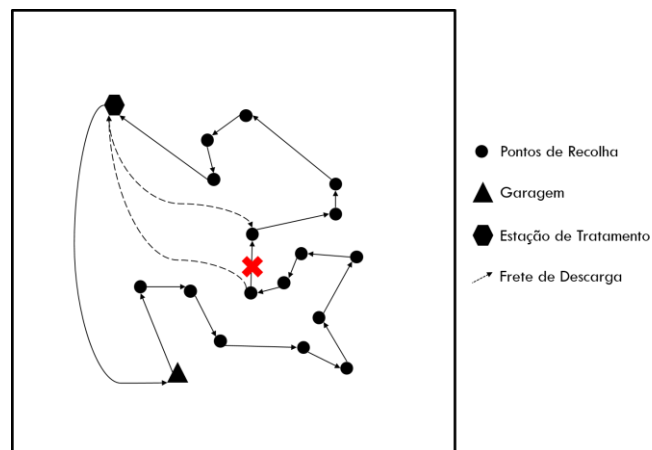


Figura 8 - Ilustração da terceira e quarta etapa do Módulo Metamorfose

A terceira etapa consiste no cálculo da carga acumulada no veículo. Esta etapa só é possível sabendo a ordem do percurso e as quantidades de resíduos produzidas em cada local. Sempre que a quantidade recolhida pelo veículo atinge a capacidade máxima, o arco anterior é retirado e a carga do veículo é renovada e volta a ser nula.

O objetivo desta fase é prever o número de fretes e identificar onde é necessário interromper o circuito de forma a restabelecer a capacidade. Se o circuito não precisar de restabelecer a capacidade, nenhum arco é eliminado e a próxima etapa é ignorada.

A quarta etapa consiste na inserção dos arcos correspondentes às viagens de descarga. Conforme o tipo de resíduo a recolher seja orgânico ou indiferenciado, os arcos eliminados na etapa anterior são substituídos por uma ligação entre o último ponto do frete e a respetiva estação de tratamento desse resíduo e outra ligação entre a estação de tratamento e o primeiro ponto do próximo frete, retomando o rumo do circuito. Por último, será selecionado o melhor circuito entre as duas soluções em análise no módulo e é devolvido um circuito completo. A terceira e quarta etapa são realizadas em simultâneo e estão representadas na Figura 8.

Na Figura 9 está representado um esquema que ilustra os diversos procedimentos do Módulo Metamorfose e a sequência de funcionamento, bem como os dados necessários e o resultado final da aplicação do Módulo.

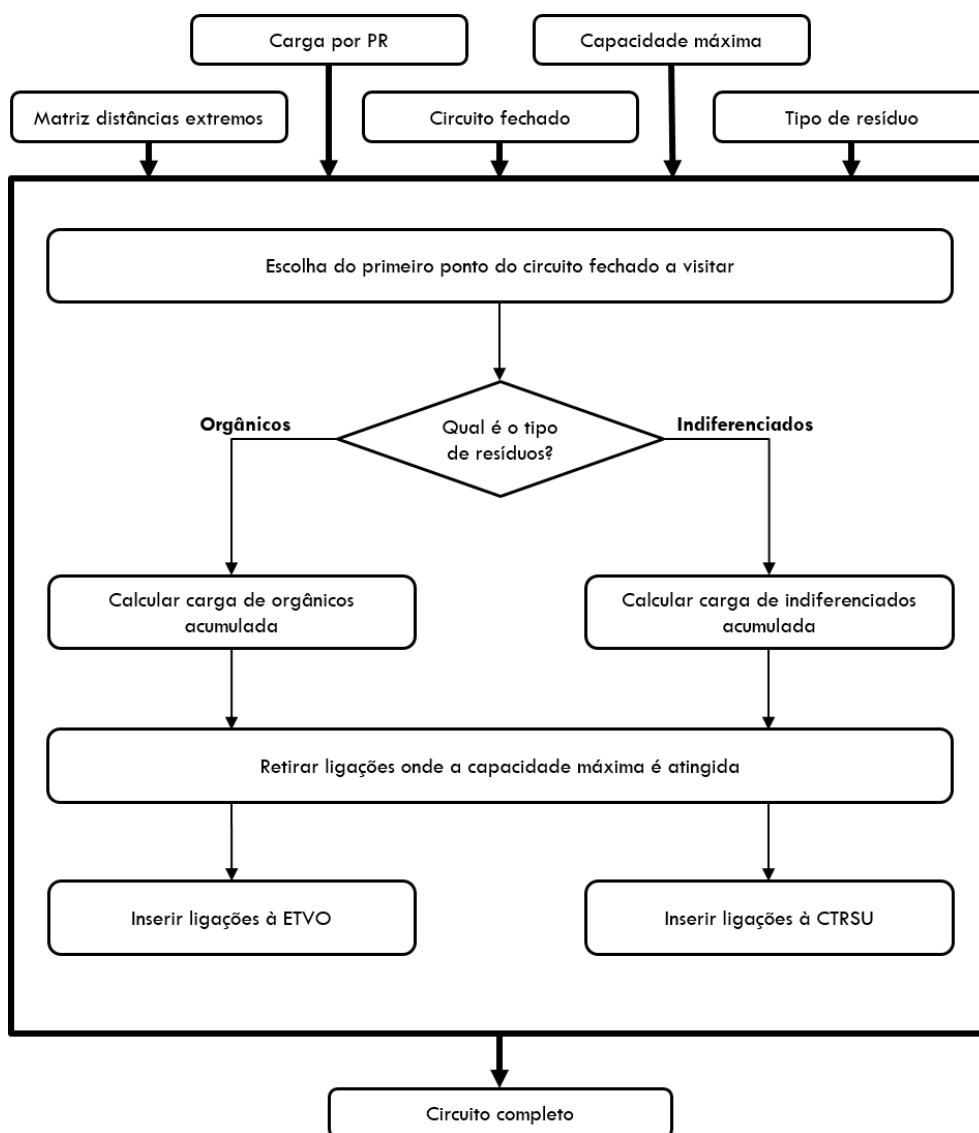


Figura 9 - Esquema do Módulo Metamorfose

No presente caso de estudo, é previsível que as cargas a recolher sejam bastante diferentes devido à heterogeneidade das dimensões dos PR. Se a realização do frete de descarga for aplicada alguns pontos de recolha antes do veículo atingir a capacidade máxima, e isso não modificar o número de fretes total, a distância total percorrida pode ser diminuída. Isto pode acontecer, por exemplo, se no circuito em estudo o frete seja aplicado a PR bastante próximos, com uma uma distância grande a percorrer nos arcos anteriores. Estas possibilidades não são equacionadas no modelo apresentado, uma vez que isso se traduziria num incremento desnecessário de complexidade sem qualquer vantagem para a comparação final dos cenários. Em vez disso, este aspeto será deixado à sensibilidade dos motoristas e cantoneiros que realizam a operação. Para além disso, a deterioração da solução devido a esta situação acontecerá em todos os algoritmos finais, o que mantém a comparação de cenários viável.

4.5.2 Módulo Fusão

O Módulo Fusão une dois circuitos completos que recolham diferentes resíduos. Foi concebido unicamente para o Cenário B dos circuitos mistos, com o fim de fundir dois circuitos que transportem cargas distintas. Os dados necessários para este módulo são dois circuitos completos de cargas distintas – indiferenciados e orgânicos – que se pretendem fundir, e ainda a matriz assimétrica de distâncias entre PR e garagem e estações de tratamento.

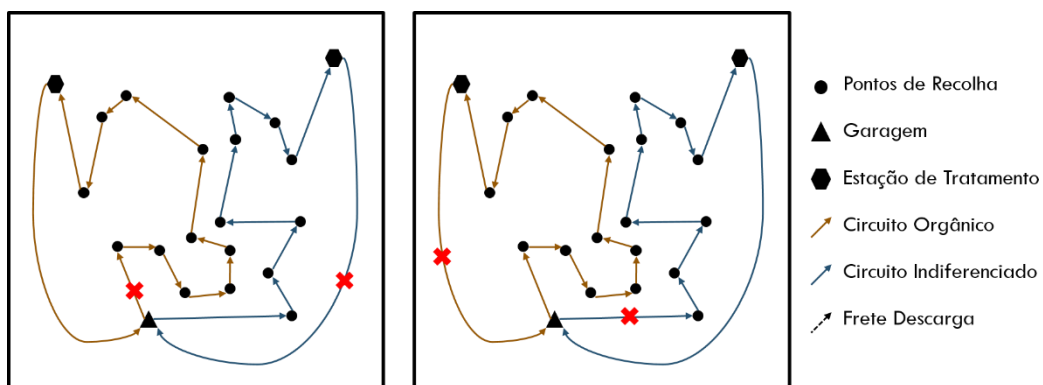


Figura 10 - Ilustração da primeira etapa do Módulo Fusão

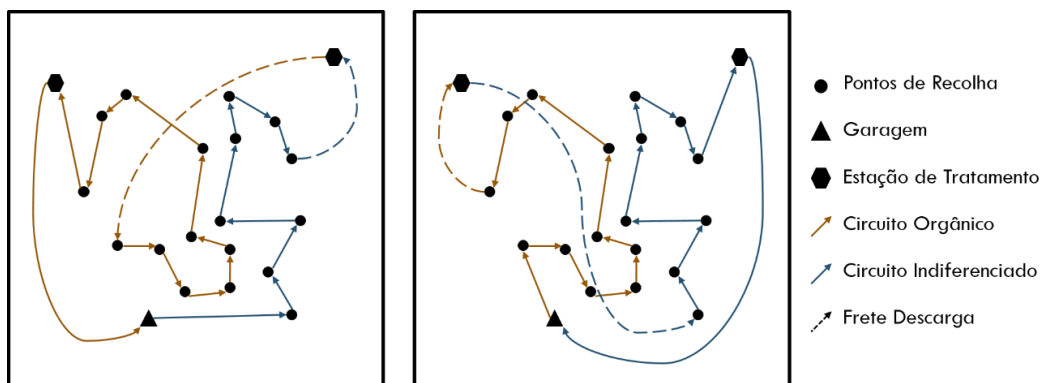


Figura 11 - Ilustração da segunda etapa do Módulo Fusão

Uma vez que os veículos considerados não são multi-compartimentados e não transportam materiais distintos, os circuitos mistos terão que recolher uma das fileiras de resíduos primeiro, descarregar, e prosseguir o circuito para a próxima fileira. Como consequência, só existem duas possibilidades de fundir os circuitos: recolher orgânicos primeiro e indiferenciados depois, ou vice-versa. O módulo avalia as duas opções e devolve a melhor solução.

Na primeira etapa deste módulo, representada na Figura 10, é selecionado e eliminado o primeiro arco de um dos circuitos e último do outro. Isto é, a ligação entre a garagem e o primeiro PR, de indiferenciados ou orgânicos, bem como a ligação entre o último PR e a estação de tratamento do circuito que sobra, são eliminados.

Na segunda etapa, representada na Figura 11, o último arco do primeiro circuito passa a ser considerado um frete de descarga, uma vez que o veículo não volta à garagem para terminar o circuito e, em vez disso, continua o circuito misto com a recolha do próximo tipo de resíduo. É então acrescentado o arco que faz a ligação entre a estação de tratamento e o primeiro PR do circuito subsequente.

O resultado deste módulo será o circuito misto com melhor desempenho entre as duas soluções que em análise. A Figura 12 ilustra o conjunto de processos do Módulo Fusão.

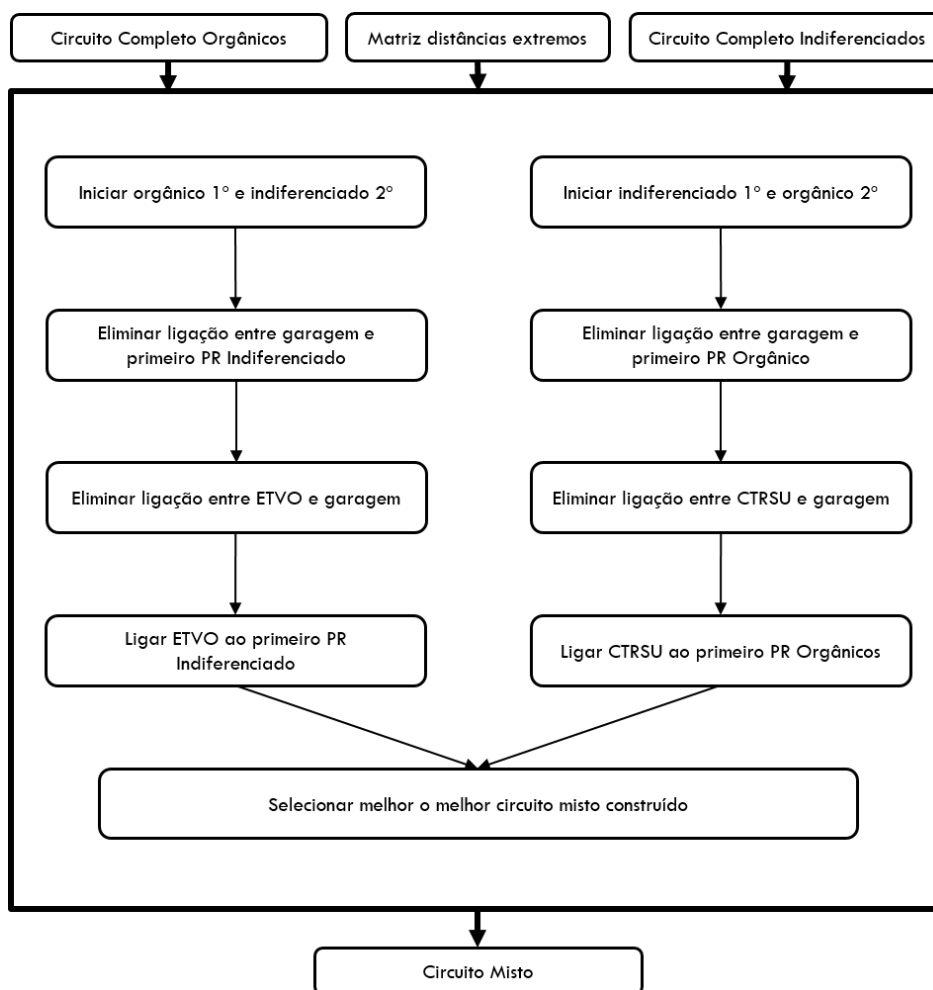


Figura 12 - Esquema do Módulo Fusão

4.5.3 Módulos dos Circuitos Orgânicos

Os módulos dos circuitos orgânicos são elaborados para acomodar a situação mais complexa do Cenário C – Circuitos Orgânicos em Entidades. Neste cenário, o objetivo passa por alocar os PR da zona do projeto piloto aos circuitos PaP de orgânicos em entidades atualmente em vigor no SGRU de Lisboa. Foi criado um módulo que permita a avaliação e seleção dos circuitos orgânicos aos quais se pretende alocar PR do projeto piloto, e outro módulo que permita essa mesma alocação. Estes módulos, tal como os módulos de construção, funcionam em conjunto.

Foi adotada uma abordagem muito simplista baseada em ideias de modelos do VRP com multidepósitos (MDVRP – *Multi-Depot Vehicle Routing Problem*). A estratégia passa por reduzir os circuitos orgânicos ao seu centro de massa para os tratar como depósitos, e de seguida simplificar o problema em diferentes fases de decisão.

Numa primeira fase, os circuitos orgânicos, reduzidos ao seu centro de massa e tratados como depósitos, serão selecionados para que lhes sejam alocados PR da zona do projeto piloto. Como estratégia de seleção, os circuitos serão avaliados de acordo com uma medida de atratividade desenvolvida para ter em conta a qualidade do circuito. Numa segunda fase, os pontos de recolha da zona do projeto piloto serão alocados aos circuitos selecionados. De forma a simplificar o problema e ter em conta o fator organizacional do problema, pretende-se minimizar o número de alterações ao sistema atual e, como tal, sempre que é selecionado um depósito (circuito orgânico), são alocados pontos de recolha até esgotar os seus recursos. Por último, serão construídas rotas para cada um dos circuitos orgânicos, tanto os que permaneceram iguais, como os que foram expandidos com a alocação dos PR do projeto piloto.

Módulo Avaliação

O módulo Avaliação reduz os circuitos orgânicos ao centro de massa, para que se comporte como um depósito, e avalia a atratividade do circuito de acordo com três critérios: a distância ao centro de massa do conjunto de PR do projeto piloto, espaço disponível e tempo disponível. A cada critério é atribuído um parâmetro que pondera o peso de cada um dos critérios utilizados. Os dados introduzidos neste módulo são a matriz assimétrica de distâncias entre todos os pontos de recolha correspondentes aos circuitos orgânicos. Este módulo implica a construção de rotas para que se possa estimar o tempo de um circuito e, por sua vez, calcular o tempo disponível. Desta forma, o módulo requer uma precedência dos módulos de construção de rotas.

Na primeira etapa deste módulo, os pontos de recolha inseridos no modelo serão agregados nos circuitos orgânicos já estabelecidos e reduzidos ao seu centro de massa, através da média das coordenadas geográficas de todos os pontos do circuito. Em paralelo, serão aplicados os módulos de construção de rotas a todos os circuitos para que seja possível atribuir-lhes as propriedades que serão necessárias à sua avaliação. Assim, cada circuito será um ponto que contém as seguintes propriedades: tempo, carga e localização.

Na segunda etapa do módulo, cada um dos critérios selecionados será avaliado individualmente, através das propriedades que foram atribuídas aos circuitos na etapa anterior. A carga disponível é calculada como a diferença entre a capacidade máxima do veículo e a carga acumulada no último frete realizado da rota em análise. Quanto menor a carga, maior o espaço disponível e melhor a sua pontuação. O tempo disponível é calculado como a diferença entre a duração máxima do circuito e a duração atual. Uma vez que são aplicados os dois módulos de construção para calcular o tempo atual do circuito, este critério já têm em conta os fretes realizados nos circuitos, bem como as distâncias e os tempos de ligação. Quanto à proximidade, são calculadas as distâncias entre todos os circuitos considerados e o centro de massa do projeto piloto. Faz-se então uma avaliação que tenha em conta a melhor proximidade como pontuação total e a pior como pontuação nula.

Na terceira etapa, e depois de cada critério ter sido avaliado individualmente para todos os circuitos, estes são avaliados na sua globalidade, tendo em conta diferentes parâmetros de avaliação para cada um dos critérios. A cada circuito será atribuída uma pontuação de acordo com a medida de atratividade desenvolvida e com os parâmetros utilizados. No presente caso de estudo, o tempo e a carga serão os critérios de maior ponderação, uma vez que o tempo será a restrição mais limitativa na construção de rotas, e a carga disponível permite “encher” um circuito com PR do projeto piloto, alterando o menor número possível de circuitos para não causar tantas perturbações no sistema.

De forma a avaliar os circuitos orgânicos foi desenvolvida uma medida de atratividade, baseada nas ideias de Ramos & Oliveira (2011) e que tivesse em conta os critérios relevantes para a alocação de PR do projeto piloto a estes circuitos. A medida de atratividade considera a proximidade do circuito ao centro de massa do projeto piloto, o tempo disponível e o espaço disponível. A avaliação é feita de acordo com a seguinte fórmula:

$$Atratividade = \alpha \frac{Q_{disponível}}{Q_{máxima}} + \beta \frac{T_{disponível}}{T_{máximo}} + \gamma \frac{Dist_{máxima} - Dist}{Dist_{máxima} - Dist_{mínima}}$$

Por último, será construída uma lista com as avaliações de todos os circuitos e ordenada por ordem decrescente de pontuação. Essa lista permite que o módulo devolva todos os circuitos orgânicos ordenados do mais atrativo para o menos atrativo.

Na Figura 13 está representado um esquema que ilustra os diversos procedimentos do Módulo Avaliação e a sequência de funcionamento, bem como os dados necessários e o resultado final da aplicação do Módulo.

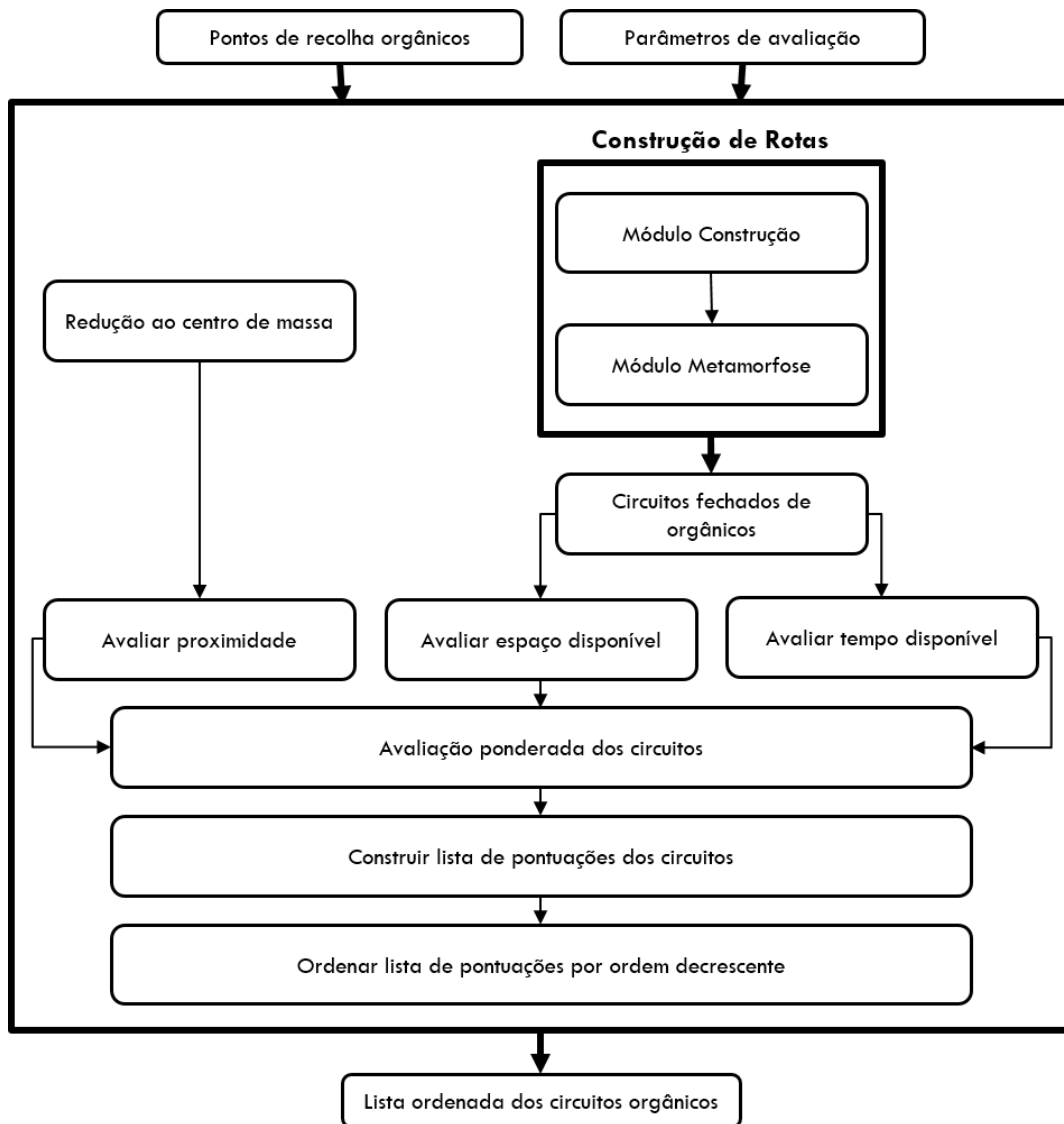


Figura 13 - Esquema simplificado do Módulo Avaliação

Módulo Alocação

O módulo Alocação seleciona os circuitos mais atrativos da lista devolvida pelo módulo anterior e aloca pontos de recolha do projeto piloto aos circuitos até todos eles ficarem alocados aos circuitos de orgânicos.

Os dados necessários para este módulo são a lista ordenada de circuitos produzida no Módulo Avaliação e ainda o conjunto de pontos de recolha do projeto piloto que se pretende alocar aos circuitos já existentes.

Ao contrário dos outros módulos, que se guiam por instruções sequenciais, este módulo têm uma estrutura por ciclos. O algoritmo só termina quando todos os pontos tiverem alocados aos circuitos orgânicos independentemente de exceder os recursos de capacidade de carga e tempo.

No ciclo principal, o primeiro passo é selecionar o primeiro circuito de orgânicos da lista de circuitos ordenada por atratividade. De seguida, o ponto de recolha mais pesado, isto é, aquele cuja produção de resíduos é maior, é selecionado como primeiro ponto a alocar ao circuito de orgânicos. Este critério foi concebido para garantir que os pontos de maior dimensão sejam alocados primeiro, para não haver ineficiências quanto ao espaço disponível desperdiçado no circuito.

No ciclo secundário, o algoritmo seleciona o ponto de recolha mais próximo do ponto de recolha que foi selecionado no ciclo principal, o mais pesado. Isto significa que, enquanto o primeiro ponto selecionado é o mais pesado para evitar ineficiências de espaço a longo prazo, os próximos pontos são selecionados de acordo com o critério de proximidade, para reduzir as distâncias percorridas e tempo despendido na futura rota. Os pontos de recolha são adicionados sucessivamente ao circuito de orgânicos até que este não tenha mais espaço disponível.

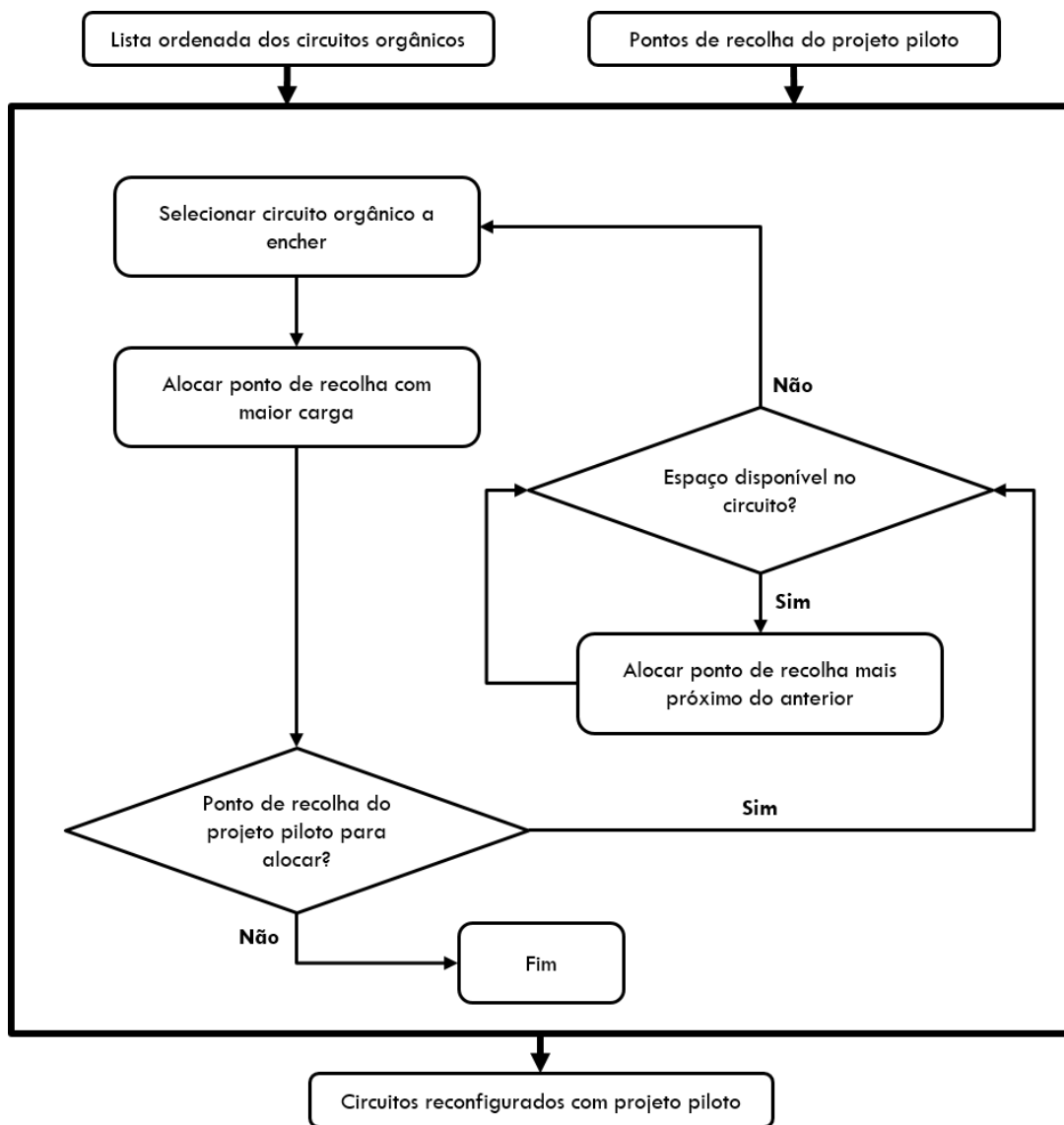


Figura 14 - Esquema simplificado do Módulo Alocação

Quanto termina o ciclo secundário, isto é, quando um dos circuitos atinge a capacidade máxima, o algoritmo seleciona o próximo circuito para encher de acordo com a lista de atratividade recebida e os ciclos repetem-se, de forma encadeada, até todos os pontos de recolha terem sido alocados a algum circuito.

Por último, o algoritmo devolve os mesmos circuitos que foram inseridos no módulo, mas reconfigurados, de forma a acomodar todos os pontos de recolha da zona do projeto piloto. O esquema da Figura 14 ilustra os diversos ciclos e etapas do Módulo Alocação.

4.5.4 Procedimentos Finais

Os módulos descritos anteriormente foram desenvolvidos para se intercalarem entre si e formarem um procedimento final para cada um dos cenários propostos. A abordagem para o algoritmo proposto resultou assim numa decomposição por módulos, os quais são acoplados em três procedimentos finais, um para cada cenário de análise. Nos casos do Cenário A e Cenário B, os circuitos serão manualmente reconfigurados de acordo com os ajustes e instruções da CML de forma a diminuir ao máximo as perturbações imputadas ao atual SGRU. O esquema dos três procedimentos está ilustrado na Figura 15, juntamente com os processos de decisão iniciais.

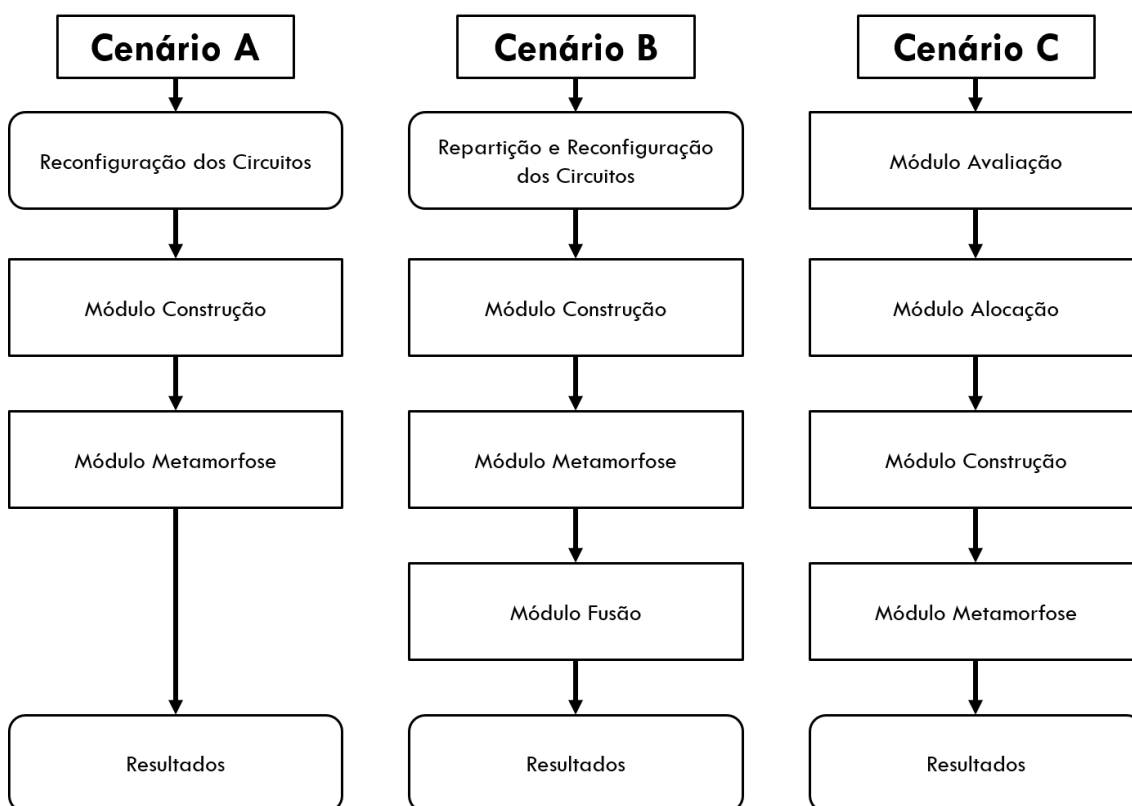


Figura 15 - Esquema dos procedimentos utilizados para a resolução dos três cenários

Capítulo 5 – Tratamento de Dados

Neste capítulo são apresentados, descritos e classificados os dados necessários para a implementação dos modelos propostos e sua aplicação à área do projeto piloto.

São apresentadas as características e a informação associadas às localizações geográficas dos pontos de recolha (PR). A estrutura dos pontos de recolha inclui a sua classificação por tipo de resíduo e tipo de operação, as suas propriedades, e ainda a forma como se agrupam em circuitos. São também caracterizadas e explicadas as distâncias obtidas e também as propriedades dos veículos.

Também são detalhados os processos realizados para a recolha das distâncias entre PR, PR e depósitos e ainda PR e garagem.

Também são descritos os processos utilizados para estimar a quantidade de resíduos orgânicos produzidos em cada ponto de recolha.

5.1 Pontos de Recolha

Um Ponto de Recolha Seletiva (PRS), ou somente Ponto de Recolha (PR), é uma localização geográfica que concentra no mesmo ponto um ou mais locais onde se procede à recolha do mesmo tipo de resíduo realizando a mesma operação. Os locais de recolha concentrados num PR têm as mesmas características, estão localizados na mesma via, e o ponto onde estão concentrados é geolocalizado no centro desse troço de via ou, se for único, no próprio local de recolha.

De acordo com a sua definição, um PR pode ser classificado essencialmente de acordo com o tipo de operação e o tipo de resíduos. O tipo de resíduo é a fileira de material que se pretende recolher, e a operação é o procedimento utilizado para a recolha dos resíduos e o sector no qual é aplicado, comercial ou doméstico.

Os pontos de recolha são organizados e agrupados em circuitos e, para além da sua classificação, possuem um conjunto de atributos essenciais para a aplicação ao caso de estudo que o caracterizam. Estes atributos foram recolhidos na base de dados geográficos da CML.

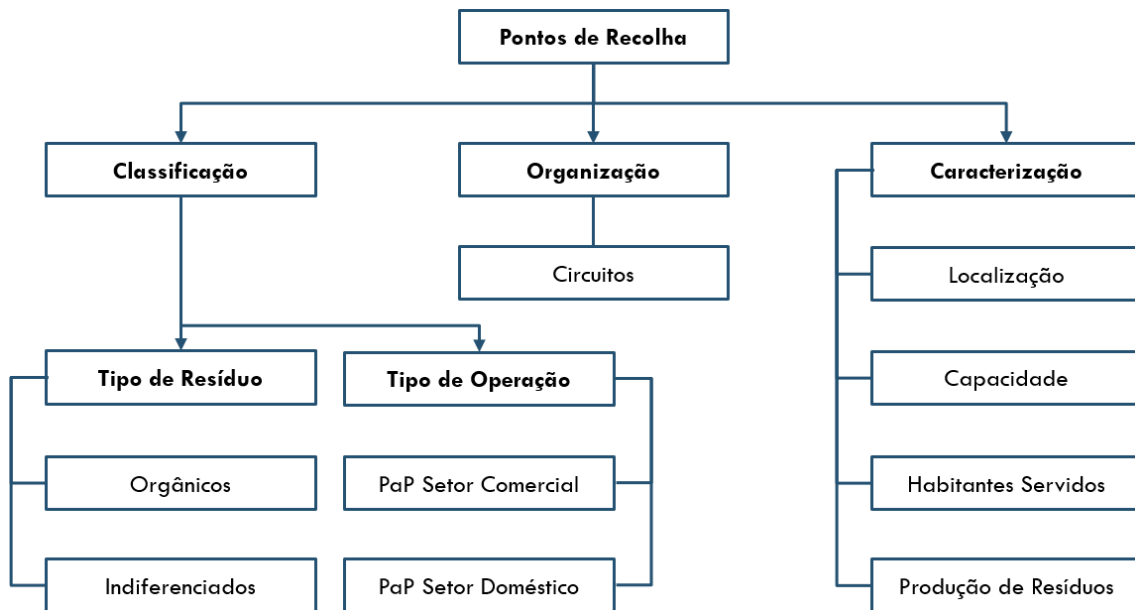


Figura 16 - Esquema da estruturação dos pontos de recolha

5.1.1 Circuitos

No Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos de Lisboa designa-se por circuito um conjunto de pontos de recolha atribuídos a um veículo e onde é recolhido o mesmo tipo de resíduos durante uma operação associada a um turno. Consequentemente, este conjunto de pontos é visitado durante o mesmo turno de trabalho e com a mesma frequência.

Tipicamente, os PR de um circuito têm a mesma classificação quanto ao tipo de resíduos a recolher e operação a realizar, embora seja possível a combinação de alguns pontos de recolha em circuitos mistos. Desta forma, os circuitos podem ser classificados da mesma maneira que os PR, de acordo com a operação a realizar e tipo de resíduos recolhidos.

Este estudo aborda o problema da implementação de um circuito de recolha de resíduos orgânicos porta-a-porta no sector doméstico em Lisboa. Foi definida uma área de estudo, chamada de zona ou circuito piloto, e três cenários para a possível implementação do circuito. No âmbito do estudo, interessam apenas os circuitos considerados nos cenários propostos, uma vez que serão esses os circuitos afetados pela introdução do circuito piloto no sistema.

Para os Cenários A e B considera-se a articulação do novo circuito com a operação PaP de recolha seletiva no sector doméstico e no Cenário C é equacionado o alargamento da operação PaP de recolha de orgânicos em entidades ao projeto piloto.

A operação PaP de recolha seletiva opera com três fluxos distintos de resíduos, o que significa que nos pontos de recolha onde se realiza esta operação, existem sempre três circuitos, um para cada tipo de resíduo, e que intercalam os dias de recolha entre si de acordo com um calendário semanal. É esperado que a produção de resíduos orgânicos seja maioritariamente oriunda dos

resíduos indiferenciados. Dos circuitos que operam em PaP seletiva no sector doméstico e que intercalam com o circuito piloto de RO, são relevantes os circuitos de indiferenciados.

Quanto à operação PaP de orgânicos, existem 14 circuitos a operar no sistema, que englobam mais de 3000 pontos de recolha correspondentes a entidades. De forma a simplificar e reduzir o tamanho do problema, foram seleccionados como alvo do estudo os circuitos que operam maioritariamente nas mesmas freguesias que os circuitos indiferenciados envolvidos no estudo. São essas as freguesias do Lumiar, Santa Clara e Alvalade.

A Tabela 6 resume os circuitos que são relevantes para a resolução do problema tratado neste estudo. Por uma questão de simplicidade, cada circuito é identificado pelo mesmo código que a CML utiliza.

| Circuito | Operação | Resíduo | Calendário | Frequência | Horário |
|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|
| I0802 | PaP Seletiva | Indiferenciado | 3ª, 5ª e sáb | 3 vezes | 22:00 |
| I0805 | PaP Seletiva | Indiferenciado | 2ª, 4ª e 6ª | 3 vezes | 22:00 |
| I0806 | PaP Seletiva | Indiferenciado | 2ª, 4ª e 6ª | 3 vezes | 22:00 |
| I0809 | PaP Seletiva | Indiferenciado | 3ª, 5ª e sáb | 3 vezes | 22:00 |
| O0301 | PaP Entidades | Orgânico | 2ª a sáb | 6 vezes | 22:00 |
| O0401 | PaP Entidades | Orgânico | 2ª a sáb | 6 vezes | 12:30 |
| O0403 | PaP Entidades | Orgânico | 2ª a sáb | 6 vezes | 12:30 |
| O0404 | PaP Entidades | Orgânico | 2ª a sáb | 6 vezes | 22:00 |
| O0601 | PaP Entidades | Orgânico | 2ª a sáb | 6 vezes | 22:00 |
| O0801 | PaP Entidades | Orgânico | 2ª a sáb | 6 vezes | 22:00 |
| O0802 | PaP Entidades | Orgânico | 2ª a sáb | 6 vezes | 12:30 |

Tabela 6 - Identificação e caracterização dos circuitos

5.1.2 Localização

A localização é o conjunto de coordenadas geográficas, longitude e latitude, que permite geolocalizar cada ponto. Esta característica é o que permite calcular as distâncias entre PR necessárias na aplicação dos modelos. Os pontos de recolha relevantes para este estudo estão assinalados no mapa da Figura 17, e agrupados por circuito.

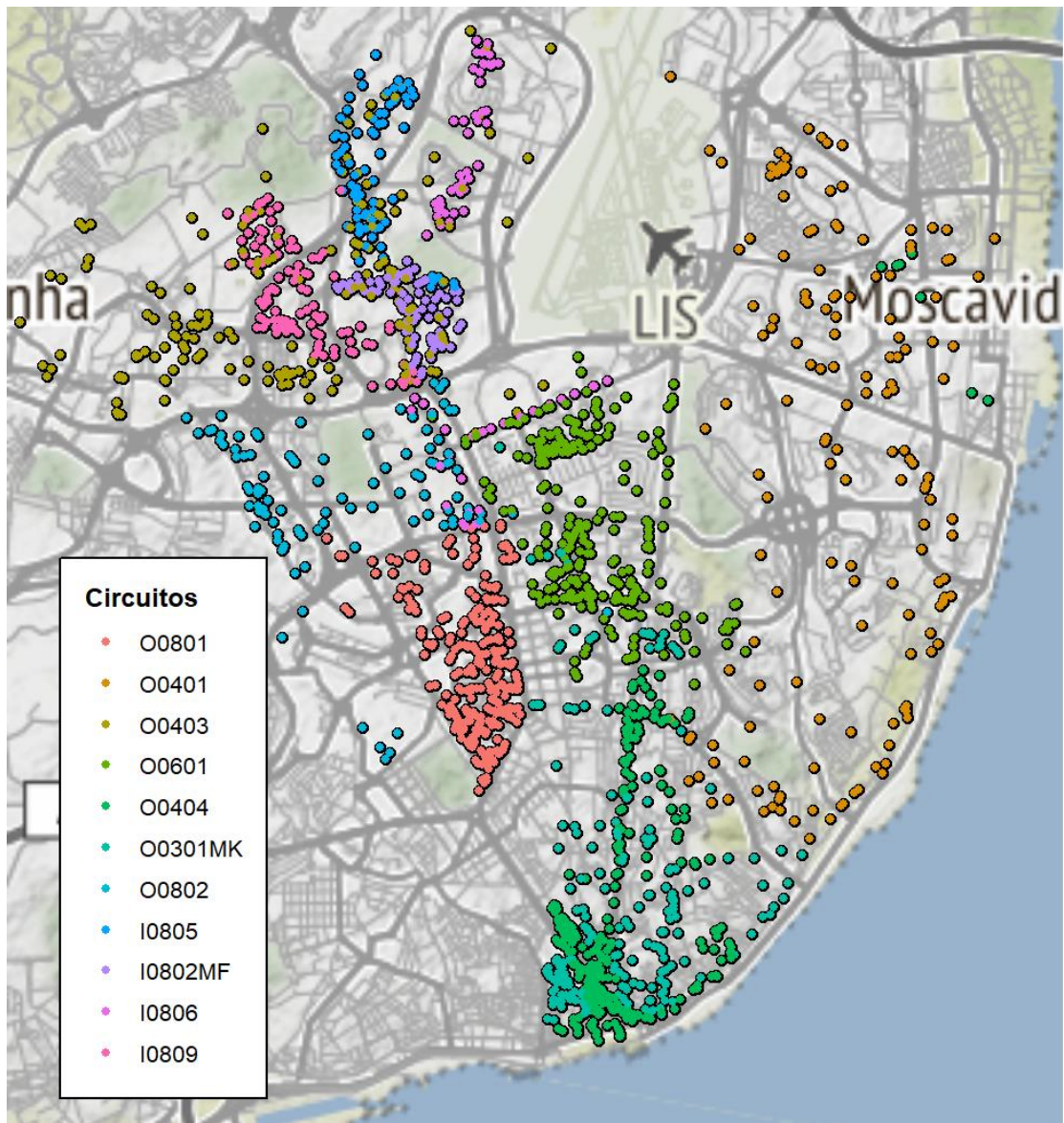


Figura 17 - Localização dos Pontos de Recolha organizados por circuito

5.1.3 Capacidade

A capacidade dos PR é o atributo que permite saber a quantidade de resíduos que podem ser armazenados nos seus contentores até ser necessário a sua remoção. Caracteriza a dimensão do PR e permite estimar a produção de resíduos orgânicos em entidades. A capacidade é a combinação do número de contentores instalados num PR com a volumetria desses contentores (Figura 18). Os contentores instalados em cada PR têm sempre a mesma volumetria.



Figura 18 - Cálculo da capacidade

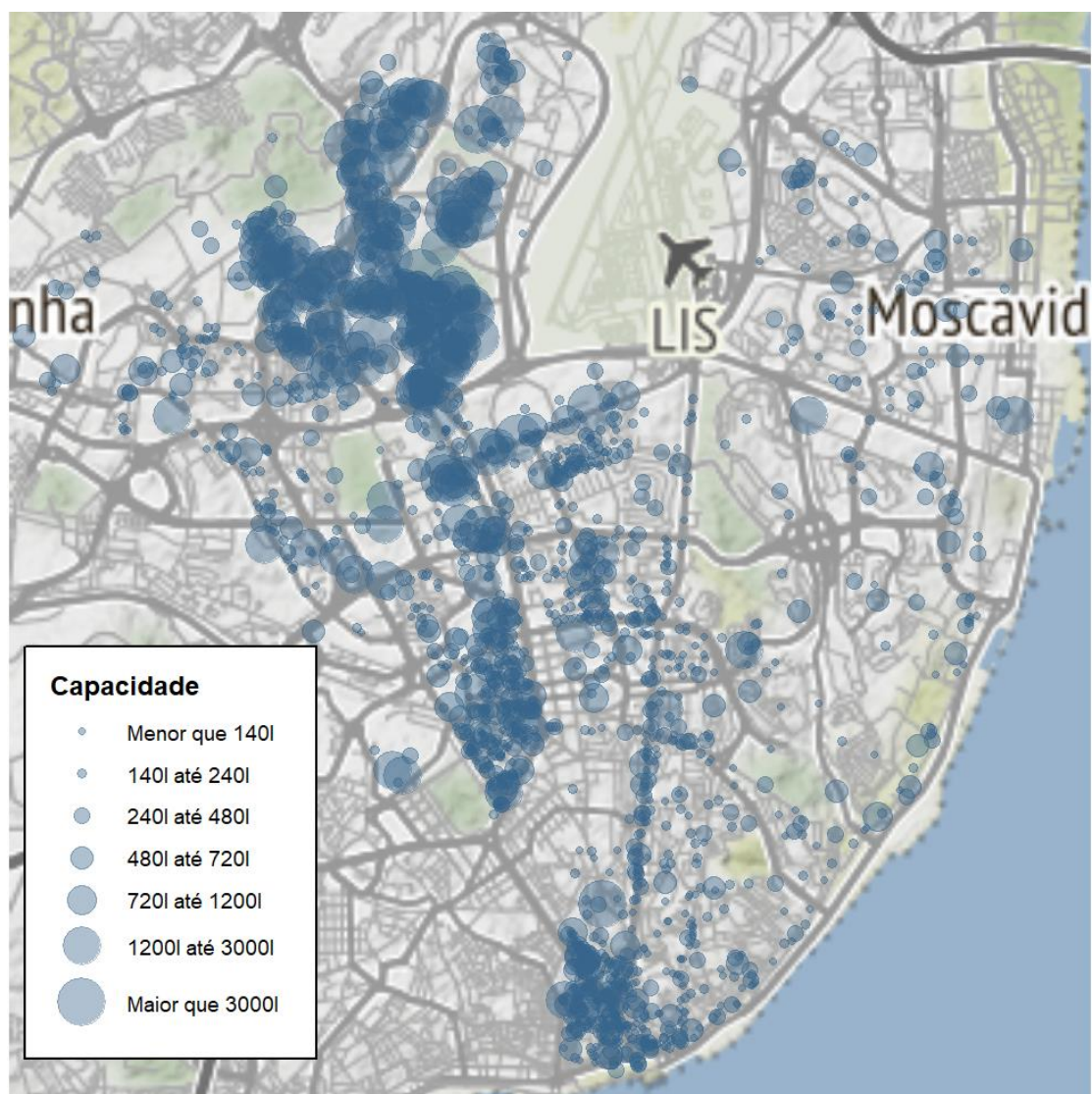


Figura 19 - Capacidade dos Pontos de Recolha

Na Figura 19 estão ilustrados os pontos de recolha envolvidos no estudo e a sua capacidade.

5.1.4 Habitantes Servidos

O número de habitantes servidos é a população total que os contentores instalados num dado PR pretende servir. Este atributo é uma característica particular dos pontos de recolha do sector doméstico, já que o sector comercial serve entidades e não especificamente a população.

Estes dados foram calculados com base no censo populacional de 2011. O censo divide a população de Lisboa em secções habitacionais, e com o apoio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), o ArcGis, foram agregadas as populações dessas secções aos pontos de recolha mais próximos.

Em algumas situações, não foi possível calcular um valor considerado aceitável, pelo que, foi utilizado o número médio de habitantes da área residencial do caso de estudo para colmatar a carência desses dados.

O número de habitantes servidos em cada PR permite estimar a produção de resíduos das operações realizadas no sector doméstico.

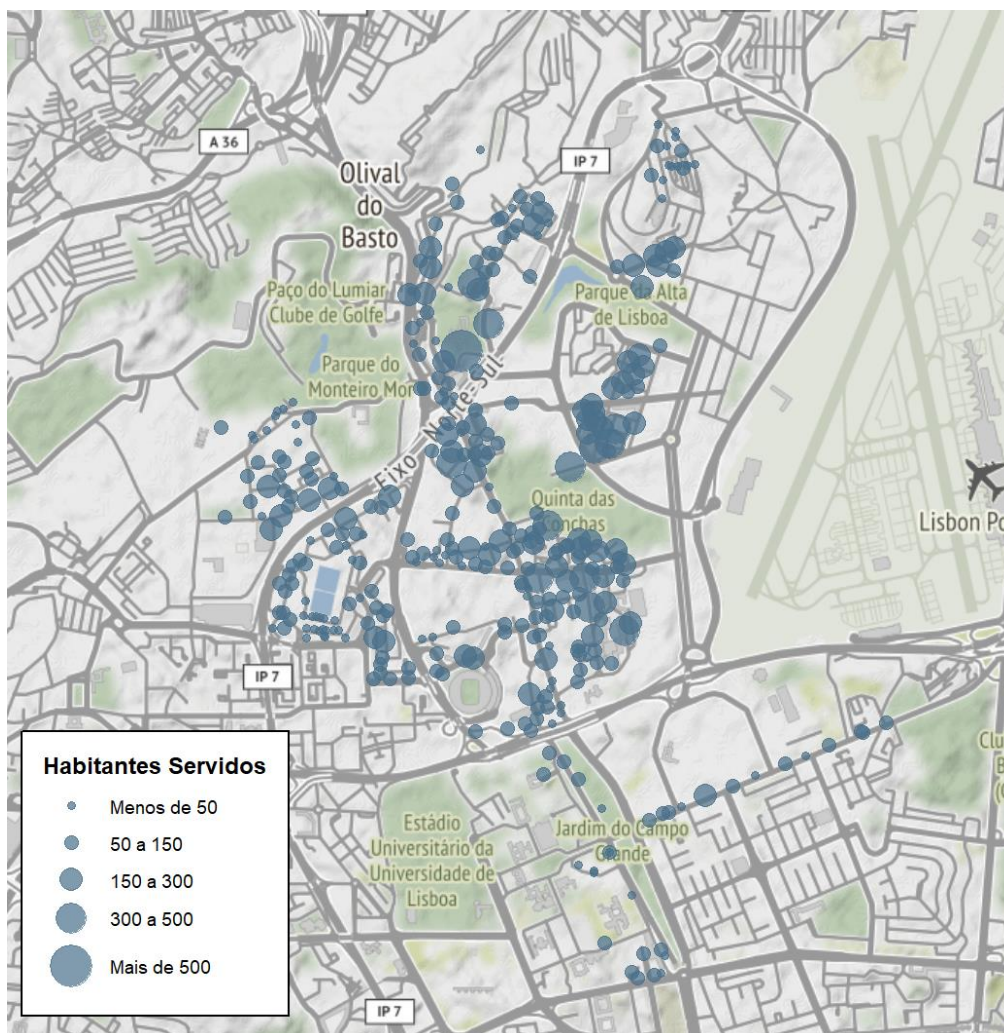


Figura 20 - Habitantes Servidos por Ponto de Recolha

5.1.5 Produção de Resíduos

A produção de resíduos é a previsão da quantidade de resíduos produzidos e depositados em cada ponto de recolha. Este é um aspeto fundamental para a aplicação da metodologia desenvolvida, pois é o que vai determinar a quantidade recolhida por circuito, o número de fretes necessários e terá também influência na duração do circuito.

Os relatórios de circuitos da CML não registam a informação das quantidades recolhidas refinadas ao nível do ponto de recolha individual. Em vez disso, os dados disponíveis são uma

agregação da quantidade total recolhida anualmente por circuito. Com a finalidade de estimar a quantidade de resíduos produzida em cada ponto, foram assumidos os seguintes pressupostos:

- O efeito da sazonalidade anual, mensal e semanal, é desprezável;
- A quantidade diária a recolher em cada PR é constante ao longo do ano;

A produção de resíduos acaba por ser uma propriedade atribuída a cada um dos PR, uma vez que é o resultado de procedimentos que utilizam a capacidade e o número de habitantes de cada ponto. Os procedimentos utilizados são diferentes para cada PR, dependendo da operação.

Produção de Resíduos no Sector Doméstico

No sector doméstico é necessário estimar a produção de resíduos indiferenciados para os circuitos que serão reconfigurados e a produção de resíduos orgânicos para o projeto piloto.

Para estimar a quantidades de resíduos indiferenciados produzidas em cada ponto de recolha no sector doméstico, a estratégia passa por distribuir uniformemente as quantidades totais recolhidas em 2018 nos circuitos PaP seletiva no sector doméstico por dia e por habitante, isto é, calcular uma capitação diária de resíduos indiferenciados para a zona abrangida neste estudo. Uma vez obtida a capitação diária, esse valor é multiplicado pelo número de habitantes servidos por ponto de recolha e pela frequência de recolha correspondente ao calendário do circuito.

Quanto aos resíduos orgânicos produzidos no sector doméstico não existe qualquer informação histórica sobre quantidades produzidas, uma vez que é um projeto piloto a ser implementado pela primeira vez em Lisboa.

Segundo relatórios da CML e Valorsul, cerca de 41% dos resíduos indiferenciados recolhidos em Lisboa são resíduos orgânicos, dos quais 4% são resíduos de jardins, que se sabe serem recolhidos em diferentes operações e com destino de tratamento diferentes. Foi então assumido que 37% dos resíduos indiferenciados produzidos em Lisboa são resíduos orgânicos.

A taxa de adesão da população à reciclagem de RO é difícil de prever, pelo que, foi utilizado um parâmetro de taxa de reciclagem para que seja possível executar análises de sensibilidade e testar diversas possibilidades de adesão da população. Numa fase inicial, para testar o verdadeiro potencial de recolha dos resíduos orgânicos, será considerada uma taxa de reciclagem de 100%.

Quantidade a recolher no sector comercial

No sector comercial, para os circuitos PaP de orgânicos em entidades, também é necessário prever a produção de resíduos produzidos por ponto de recolha.

A estratégia utilizada neste caso passa por calcular as quantidades médias recolhidas por circuito em 2018 e fazer uma distribuição ponderada da quantidade média por capacidade do PR.

Para a ponderação dos resíduos foi utilizada a fração da capacidade individual de um PR pela capacidade total dos pontos de recolha de um circuito.

Foi assumido que a dimensão dos pontos de recolha, isto é, a sua capacidade, está diretamente relacionada com a quantidade de resíduos produzidos nesse ponto. Isto deve-se a que a capacidade instalada tenha sido uma reação à maior produção de resíduos numa dada entidade.

5.2 Distâncias

Neste tipo de problemas é fundamental saber previamente as distâncias entre todos os pontos de recolha considerados para o problema em estudo, e ainda as distâncias entre os PR e depósitos. Entende-se por depósito ou extremo a localização do início e final dos circuitos deste estudo, isto é, a garagem ou uma das estações de tratamento onde são descarregados os resíduos, ETVO e CTRSU.

As distâncias são o principal indicador chave de performance das rotas, uma vez que refletem o seu custo, por estarem relacionadas com a quilometragem percorrida, combustível utilizado, duração dos circuitos e manutenção dos veículos. Por isso mesmo, merecem especial destaque e cuidado para a sua medição.

Para obter as distâncias entre todos os PR de interesse ao estudo, foi necessário recolher informação sobre a localização desses pontos, registada pela CML em coordenadas geográficas. Todas as distâncias entre PR foram apuradas com base em cartografia digital vetorial da rede viária adquirida ao Instituto Geográfico do Exército e recorrendo a um algoritmo de caminhos mais curtos incorporado no Sistema de Informação Geográfica (SIG) utilizado, o ArcGis.

Por outro lado, as localizações em coordenadas geográficas dos depósitos não foram disponibilizadas pela CML, pelo que, tiveram que ser usados outros métodos para o cálculo dessas distâncias.

O Google têm uma API (*Application Programming Interface* – Interface de Programação de Aplicações) de geolocalização, o *Google Maps Platform*, que oferece serviços de geocodificação e determinação de rotas e distâncias entre localizações. A biblioteca *ggmap*, desenvolvida por David Kahle & Hadley Wickham (2019), e disponível para o R versão 3.6.1 (R Core Team, 2019), conecta esses serviços com o ambiente de desenvolvimento integrado do R. Com estas ferramentas, foi desenvolvida uma aplicação para determinar as distâncias entre PR e depósitos. Primeiro, as localizações da garagem, ETVO e CTRSU, que foram obtidas em endereço através do *Google Maps*, são convertidas em coordenadas geográficas, longitude e latitude. Depois, a aplicação calcula e gera uma lista com todas as distâncias necessárias.

É importante notar que todas as distâncias foram obtidas nos dois sentidos, uma vez que a rede viária de Lisboa é bastante complexa, e na sua maioria, a distância entre duas localizações é diferente nos dois sentidos.

5.3 Veículos de Recolha

O sistema de gestão de resíduos de Lisboa é complexo e de grandes dimensões, pelo que, a frota de veículos utilizada pela CML na recolha de resíduos é extensa e diversificada. Por uma questão de organização e simplicidade, a cada circuito é atribuído um veículo e uma tripulação que será responsável pela sua realização.

A extensão da frota concede ao sistema alguma flexibilidade na utilização de veículos para as diversas operações, o que permite apoiar e colmatar problemas inerentes ao dia a dia das operações. Por exemplo, se um veículo responsável por um circuito tiver em manutenção, ser-lhe-á atribuído outro veículo semelhante de substituição.

Isto implica que, apesar de a cada circuito lhe ser facultado um veículo particular, os veículos utilizados em cada circuito são quase sempre diferentes. Esta situação é verificada nos relatórios de circuitos da CML. No entanto, é garantida a informação de que os veículos de substituição, salvo raras exceções que não serão consideradas, terão sempre as mesmas características.

A tripulação, por sua vez, é constituída pelo motorista da viatura e dois cantoneiros de apoio à recolha. Tal como no caso dos veículos, existem situações nas quais um elemento da tripulação poderá atrasar ou não comparecer. Assume-se que as faltas serão sempre compensadas com um elemento de substituição e que nenhum circuito ficará comprometido devido a faltas de comparência ou atrasos.

Podemos partir do pressuposto que os circuitos estudados serão sempre realizados por viaturas semelhantes e que a tripulação terá sempre o mesmo horário. A capacidade máxima e velocidade média dos veículos, bem como o turno da tripulação são três características essenciais para a implementação da metodologia proposta.

5.3.1 Capacidade Máxima

A capacidade máxima dos veículos é a quantidade máxima de resíduos que um veículo pode transportar durante a realização de um circuito. Na metodologia proposta, esta característica é a restrição que define a realização de fretes de descarga durante o circuito para que o veículo possa continuar o seu percurso normal.

Este estudo incide sobre dois tipos de resíduos diferentes, orgânicos e indiferenciados. Cada tipo de resíduos corresponde a diferentes materiais, com diferentes densidades, levando a que, para o mesmo volume do veículo, existam diferentes capacidades máximas.

A capacidade máxima dos veículos para resíduos indiferenciados foi concedida pela CML, depois de uma extensa análise aos relatórios de circuitos indiferenciados e do historial de descargas efetuadas.

Os veículos conseguem transportar até 10 toneladas de resíduos indiferenciados. Para absorver a variabilidade não contemplada por tomar valores médios de quantidades recolhidas, o valor utilizado nos modelos será de 9000 quilogramas, correspondente a um fator de utilização de 90% da capacidade máxima.

Para os resíduos orgânicos, os dados fornecidos pela CML não estavam detalhados da mesma maneira. Em vez disso, foi realizada uma análise aos relatórios dos fretes e circuitos da operação PaP de orgânicos em entidades realizados no ano de 2018.

Todos os circuitos realizados com mais que um frete de descarga foram selecionados. Foi assumido que o primeiro frete desses circuitos resulta da falta de capacidade disponível para transportar mais resíduos. Esses fretes foram identificados e selecionados como fretes cheios que, por isso mesmo, representam a capacidade máxima do veículo para resíduos orgânicos.

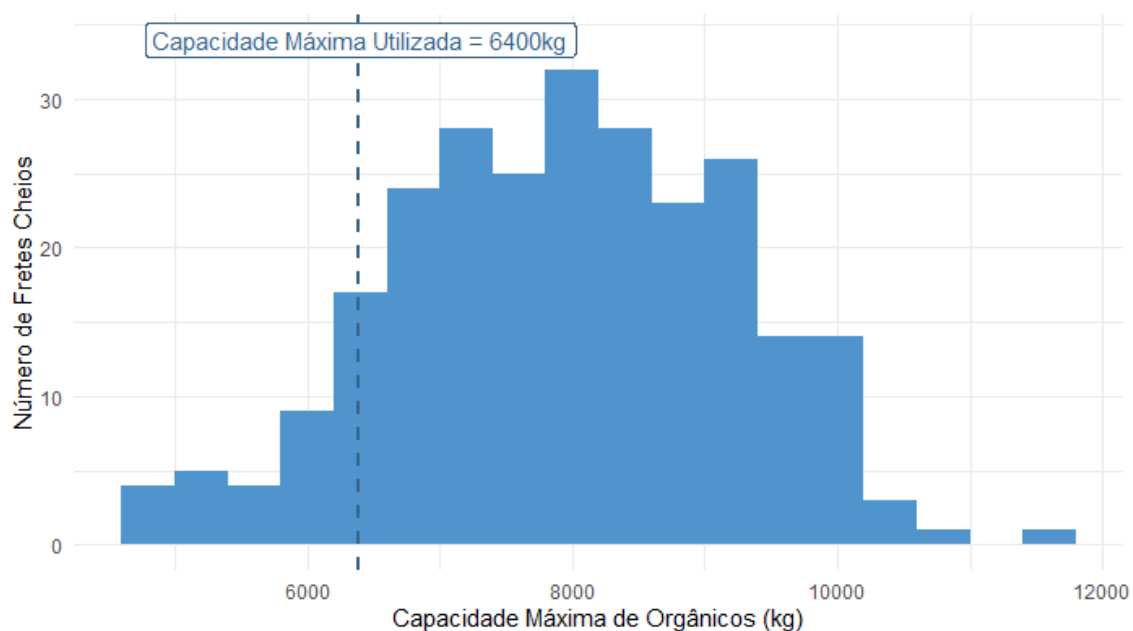


Figura 21 – Distribuição das capacidades máximas de orgânicos (2018)

O histograma representado na Figura 21 retrata a distribuição dos fretes cheios. Como se pode verificar, existe uma considerável dispersão na distribuição da carga total que um veículo é capaz de transportar. De forma a garantir que a capacidade máxima utilizada no modelo não é demasiado otimista, foi selecionado o valor de 6400 quilogramas, correspondente ao percentil 10% desta distribuição. Ao assumir este valor, é esperado que 90% dos fretes consigam transportar pelo menos esta carga. A Tabela 7 resume as capacidades máximas obtidas nesta secção por tipo de resíduo.

Tabela 7 - Capacidade máxima do veículo por tipo de resíduo

| Tipo de Resíduo | Capacidade Máxima (kg) |
|-----------------|------------------------|
| Orgânico | 6400 |
| Indiferenciado | 9000 |

5.3.2 Velocidade Média

A velocidade média do veículo é um parâmetro importante para determinar a duração de uma rota, testar a restrição relacionada com o tempo e avaliar o seu desempenho. Estes valores foram facultados pela CML e são distinguidos entre velocidade média de recolha e velocidade média de ligação.

A velocidade média de recolha inclui o tempo de circulação em via entre os PR e ainda o tempo de paragem despendido para a remoção de resíduos dos contentores. Este parâmetro permite calcular o tempo de recolha de um circuito.

A velocidade média de ligação, por sua vez, inclui os tempos de circulação em via entre as seguintes ligações:

- A garagem e o primeiro PR, onde o processo de recolha é iniciado;
- Fretes de descarga, que inclui a viagem de ida à estação de tratamento desde o PR onde é atingida a capacidade máxima, e a viagem de volta ao PR o circuito retoma o percurso;
- O último PR, onde termina a recolha, e a estação de tratamento onde são entregues os resíduos;
- A estação de tratamento e o retorno à garagem.

Estes parâmetros são diferentes para cada operação de recolha. Os circuitos de recolha de orgânicos em entidades resultam numa velocidade média de recolha superior porque os PR que lhes estão atribuídos são tipicamente de menor dimensão e mais dispersos que os PR da operação PaP seletiva no sector doméstico. O resumo destes parâmetros podem ser consultados na Tabela 8.

Tabela 8 - Velocidades médias por tipo de operação

| Tipo de Operação | Velocidade Média de Recolha (km/h) | Velocidade Média de Ligação (km/h) |
|--------------------------------|---|---|
| PaP Seletiva Doméstico | 8.65 | 24 |
| PaP Orgânicos Entidades | 12.6 | 24.1 |

5.3.3 Duração Máxima

A duração máxima de um circuito corresponde à duração útil de um turno de trabalho da tripulação do veículo. Nos modelos propostos, este parâmetro é uma das principais restrições de um circuito e um dos seus principais indicadores de desempenho.

Um turno de trabalho, independentemente do seu horário, corresponde a 7 horas, às quais se desconta 30 minutos de pausa para alimentação, o que resulta numa duração útil de 6 horas e meia.

Capítulo 6 – Aplicação ao Caso de Estudo

Neste capítulo são descritas as aplicações dos procedimentos finais desenvolvidos para cada um dos cenários em análise.

Em primeiro lugar, os circuitos são reconfigurados de acordo com os cenários propostos. Os procedimentos desenvolvidos no Capítulo 4 são aplicados a cada um dos cenários em análise, de forma a obter resultados. De seguida, os resultados da aplicação da Metodologia são ilustrados em tabelas e analisados. Por último, os resultados são confrontados de forma a oferecer uma análise aos vários cenários de análise dos projeto piloto possíveis, juntamente com vantagens e desvantagens da implementação prática de cada um deles quanto aos fatores propostos inicialmente: fator económico e fator organizacional.

6.1 Resolução do Cenário A – Reconfiguração de Circuitos

A resolução do Cenário A – Reconfiguração dos Circuitos, é aplicada aos quatro circuitos de indiferenciados apresentados no capítulo anterior. Os circuitos são reconfigurados, com os calendários e respetivas periodicidades a serem alternados para acomodar a nova reconfiguração, e de seguida, os módulos desenvolvidos são aplicados e os resultados obtidos.

6.1.1 Reconfiguração dos Circuitos

O Cenário A, uma vez que se prende com a introdução de um novo circuito na operação PaP seletiva no sector doméstico, implica a reconfiguração de todos os circuitos com PR na zona selecionada para o projeto piloto. A reconfiguração é centrada num circuito configurado somente para resíduos orgânicos, denominado de Circuito Piloto Orgânicos. Os restantes serão alterados em conformidade.

O novo circuito implica as seguintes alterações nas configurações dos circuitos:

- A área geográfica definida para o projeto piloto será agrupada, formando o circuito piloto;
- Os circuitos de indiferenciados mais afetados pela configuração do circuito piloto, o I0802MF e o I0806, serão reagrupados, formando o circuito fundido;
- Os restantes circuitos, o I0805 e o I0809, serão reconfigurados, registando apenas pequenas alterações de transferência de PR para o circuito piloto.

Na Figura 22 estão representadas as alterações efetuadas entre os circuitos de indiferenciados originais operados pela CML e os circuitos decorrentes da possível implementação do Cenário A.

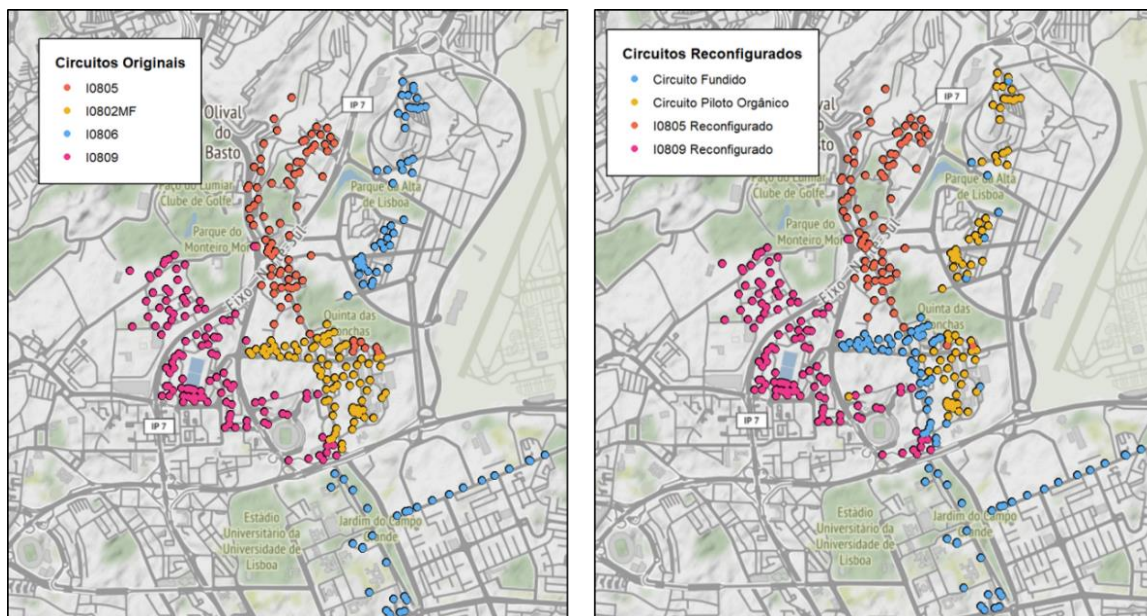


Figura 22 - Reconfiguração dos circuitos no Cenário A

Podemos observar algumas anomalias, uma vez que alguns pontos de recolha estão muito dispersos relativamente à maioria da sua zona de afetação, como é o caso de alguns pontos de recolha do circuito fundido dispersos na zona do circuito piloto. Estes casos podem acontecer se, por exemplo, esses pontos de recolha não tiverem sido selecionados por servirem residências sem infraestruturas que possibilitem a introdução dos novos contentores de orgânicos.

Uma vez resolvida a fase da reconfiguração de circuitos, serão aplicados os módulos de construção de rotas, de forma a gerar percursos para cada um dos circuitos e obter os resultados para cada um deles.

6.1.2 Resultados Obtidos para o Cenário A

Após a aplicação do procedimento desenvolvido para o Cenário A e os seus módulos, são apresentados os resultados obtidos. Na Tabela 9 estão representadas as estimativas dos tempos de realização das rotas e na Tabela 10, estão representadas as estimativas das distâncias percorridas. Tanto o tempo como a distância percorrida dos circuitos estão divididos na componente de recolha e ligação, já explicados no Capítulo 5, para que seja possível analisar o impacto de cada uma delas.

Tabela 9 - Tempos de realização das rotas obtidas para o Cenário A em horas

| Circuitos Reconfigurados | Tempo de recolha | Tempo de ligação | Tempo total |
|--------------------------|------------------|------------------|---------------|
| <i>Circuito piloto</i> | 1,670 | 2,488 | 4,158 |
| <i>Circuito fundido</i> | 2,146 | 2,636 | 4,782 |
| <i>Circuito I0805</i> | 1,611 | 2,812 | 4,423 |
| <i>Circuito I0809</i> | 1,893 | 2,904 | 4,797 |
| Total | 7,320 | 10,839 | 18,159 |

Tabela 10 - Distâncias percorridas para o Cenário A em metros

| Circuitos Reconfigurados | Distância de recolha | Distância de ligação | Distância total |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| <i>Circuito piloto</i> | 14448 | 59703 | 74151 |
| <i>Circuito fundido</i> | 18559 | 63265 | 81824 |
| <i>Circuito Reconfigurado I0805</i> | 13936 | 67490 | 81426 |
| <i>Circuito Reconfigurado I0809</i> | 16374 | 69685 | 86059 |
| Total | 63318 | 260143 | 323461 |

Na Figura 23 está representado o resultado final da aplicação do Módulo de Construção nos quatro circuitos reconfigurados deste cenário. Inclui os ciclos fechados de cada rota, ainda sem as ligações entre o depósito e as estações de tratamento e igualmente sem a adição dos fretes de descarga. É possível observar a proximidade e densidade de PR e como algumas rotas se cruzam entre si, sugerindo que as rotas poderiam ser melhoradas. Este fenómeno deve-se à configuração de circuitos imposta pela CML.

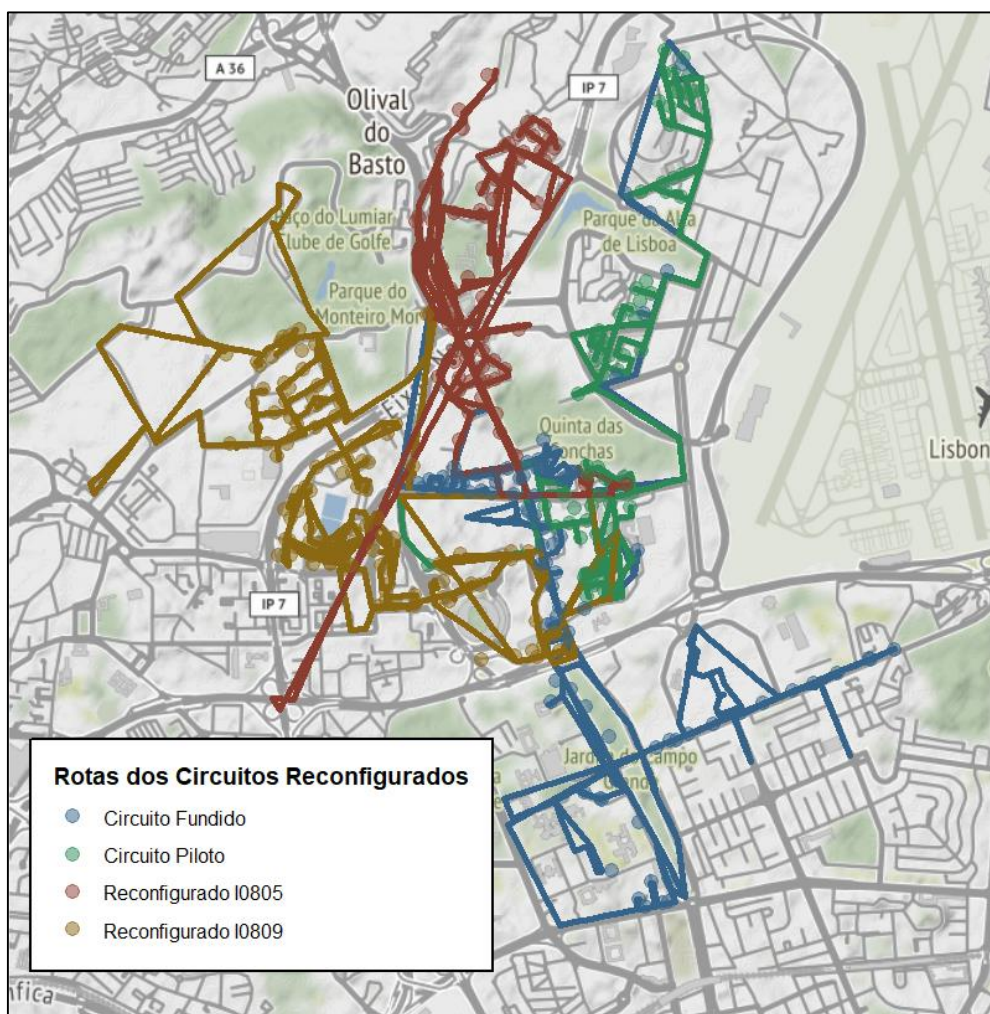


Figura 23 - Mapa das rotas calculadas para o Cenário A

6.2 Resolução do Cenário B – Circuitos Mistos

A resolução do Cenário B – Circuitos Mistos, é aplicada aos quatro circuitos de indiferenciados apresentados no capítulo anterior, tal como no Cenário A. Os circuitos são repartidos em circuitos parciais de orgânicos e indiferenciados, e são realizadas algumas reconfigurações simples para que não existam ineficiências óbvias. Neste cenário não é necessário aplicar alterações aos calendários dos circuitos originais. De seguida, os módulos Construção, Metamorfose e Fusão são aplicados de acordo com o procedimento desenvolvido no Capítulo 4, de forma a obter rotas para cada um dos novos circuitos.

6.2.1 Repartição e Reconfiguração de Circuitos

O Cenário B também consiste na articulação da zona do projeto piloto com a operação PaP Seletiva no Sector Doméstico. No entanto este cenário resulta de outra modalidade de implementação na qual os circuitos, em vez de serem totalmente reconfigurados, sofrem apenas as alterações mínimas necessárias para reduzir ineficiências óbvias, e acomodam a recolha de orgânicos na zona do projeto piloto através de circuitos mistos com dois fretes.

Se os quatro circuitos fossem integralmente divididos em circuitos parciais de orgânicos e indiferenciados, haveria dois circuitos parciais de orgânicos com menos de 5 PR, causando grande ineficiência desses circuitos parciais. Desta forma, durante a fase de reconfiguração de rotas, foram transferidos os PR da zona do projeto piloto que pertenciam originalmente aos circuitos I0806 e I0809 para o circuito I0802MF, uma vez que, depois de analisados os dados da empresa, este circuito recolhe em média menos carga e realiza os circuitos em menos tempo que o circuito I0806.

Depois de reconfigurados, os dois circuitos que incorporam os PR da zona selecionada foram repartidos. Os PR de orgânicos foram agrupados em circuitos parciais de orgânicos e os restantes pontos de recolha, que vão intercalar no calendário com indiferenciados, foram agrupados em circuitos parciais de indiferenciados. A Figura 24 ilustra essa repartição com os resultados da repartição dos circuitos I0802MF e I0806 em circuitos parciais de resíduos orgânicos e resíduos indiferenciados e ainda as alterações menores efetuadas aos circuitos originais I0805 e I0809.

Finda esta fase, são aplicados os módulos de construção de rotas em cada um dos circuitos, tanto os normais como os parciais, depois da obtenção de rotas, é aplicado o Módulo de Fusão aos circuitos parciais para os fundir em circuitos mistos com a realização de fretes de descarga para proceder à recolha de dois tipos de resíduos distintos.

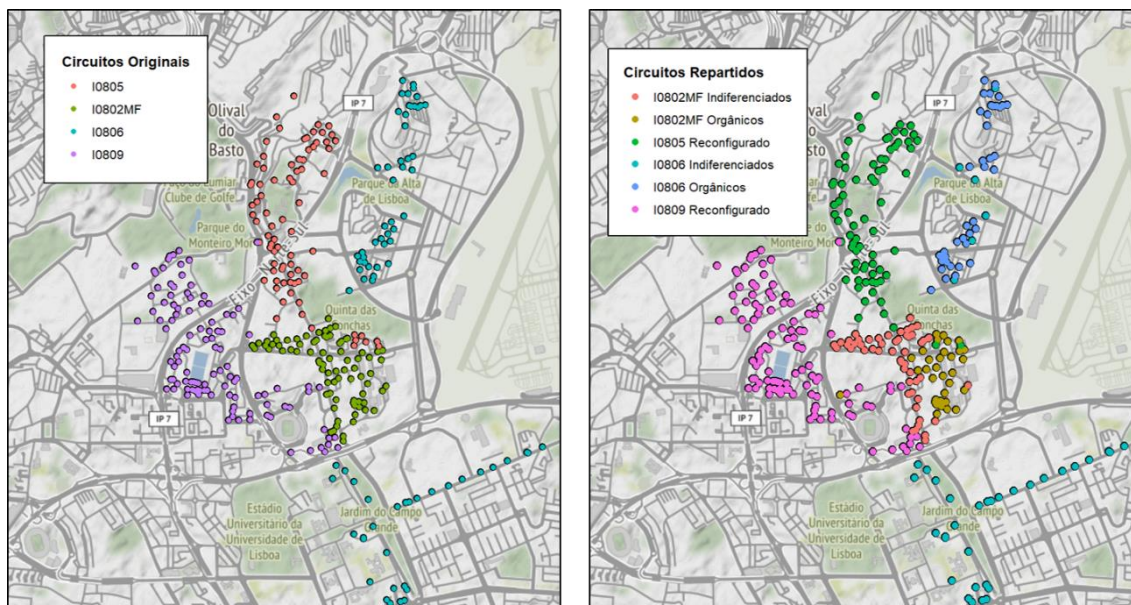


Figura 24 - Repartição dos circuitos para o Cenário B

6.2.2 Resultados Obtidos para o Cenário B

Após a aplicação do procedimento desenvolvido para o Cenário B, foram obtidos os tempos de realização em horas, resumidas na Tabela 11, bem como as distâncias percorridas em metros e resumidas na Tabela 12. As rotas calculadas estão representadas no mapa da Figura 25, onde se verifica a mesma problemática descrita para o Cenário A.

Tabela 11 - Tempos de realização das rotas obtidas para o Cenário B em horas

| Circuitos Mistos | Tempo de recolha | Tempo de ligação | Tempo total |
|-------------------------------------|------------------|------------------|---------------|
| <i>Circuito misto I0802MF</i> | 1,503 | 2,200 | 3,703 |
| <i>Circuito misto I0806</i> | 2,695 | 2,279 | 4,973 |
| <i>Circuito reconfigurado I0809</i> | 2,043 | 2,766 | 4,809 |
| <i>Circuito reconfigurado I0805</i> | 1,754 | 2,906 | 4,661 |
| Total | 7,995 | 10,151 | 18,146 |

Tabela 12 - Distâncias percorridas para o Cenário B em metros

| Circuitos Mistos | Distância de recolha | Distância de ligação | Distância total |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| <i>Circuito misto I0802MF</i> | 13004 | 52797 | 65801 |
| <i>Circuito misto I0806</i> | 23307 | 54695 | 78003 |
| <i>Circuito reconfigurado I0809</i> | 17672 | 66372 | 84044 |
| <i>Circuito reconfigurado I0805</i> | 15176 | 69753 | 84929 |
| Total | 69160 | 243617 | 312777 |

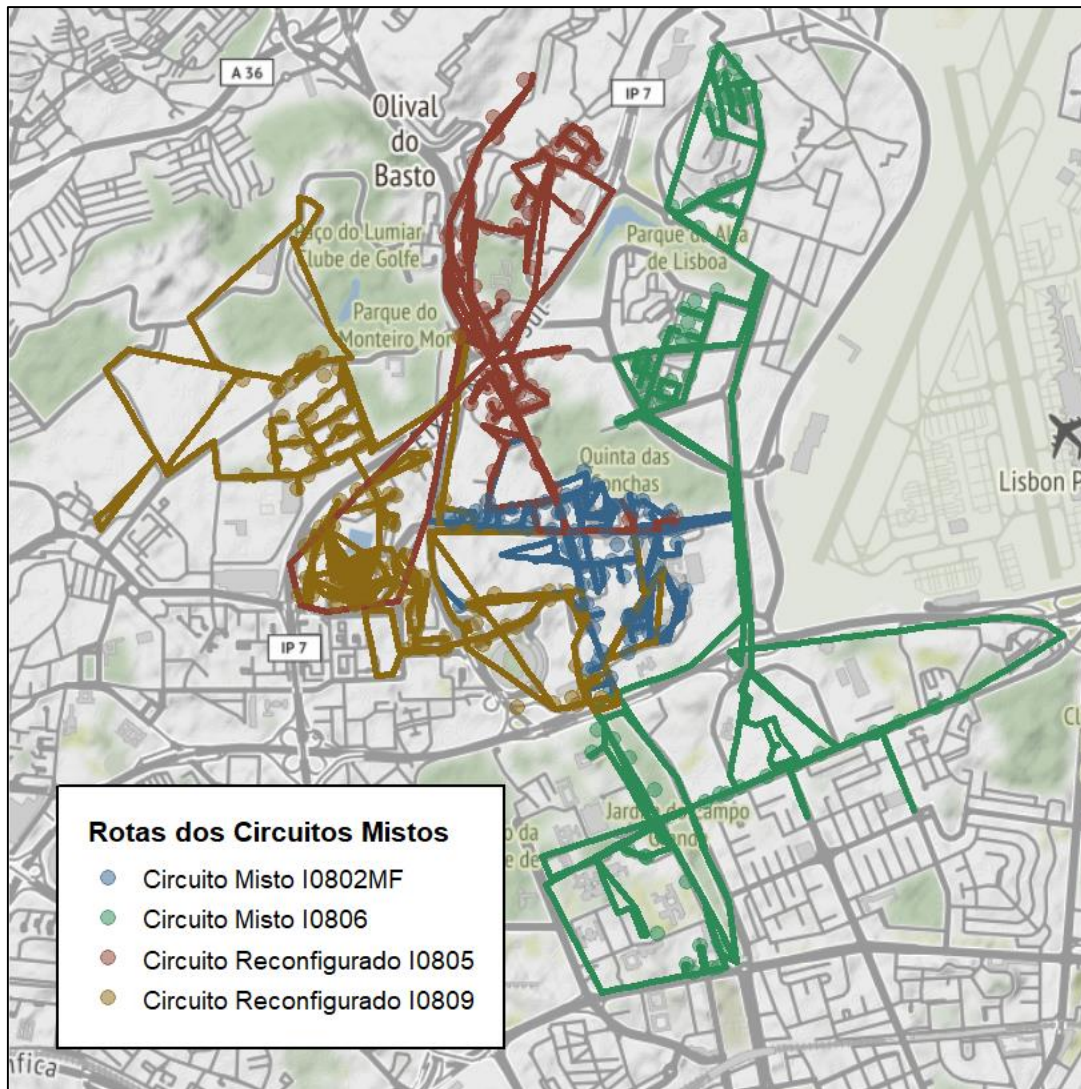


Figura 25 - Mapa das rotas calculadas para o Cenário B

6.3 Resolução do Cenário C – Circuitos Orgânicos em Entidades

Os circuitos PaP de Orgânicos em Entidades não são diretamente afetados pela integração da recolha de resíduos orgânicos no sector doméstico, pois recolhem em entidades e não em residências. No entanto, uma vez que partilham o mesmo fluxo de resíduos, constituem uma oportunidade de aproveitamento dos recursos disponibilizados para os circuitos que realizam a recolha com a operação PaP de orgânicos em entidades, dando origem a este cenário.

Ao contrário dos dois cenários anteriores onde a reconfiguração dos circuitos foi aplicada manualmente de acordo com as imposições da CML, a resolução do Cenário C – Circuitos Orgânicos em Entidades é mais complexa, e inclui dois módulos auxiliares. Estes módulos ajudam no processo de decisão para a reconfiguração e expansão dos circuitos originais de orgânicos necessários para a recolha de RO no sector doméstico.

Assim, para a resolução deste cenário, são aplicados os módulos de construção a todos os circuitos para que possam ser avaliados. O Módulo de Avaliação é aplicado para proceder a essa avaliação e o Módulo Alocação é aplicado para alocar os PR do projeto piloto, expandindo assim alguns dos circuitos originais de orgânicos. Por fim, os módulos de construção são aplicados para obtenção de rotas e respectivos tempos de realização e distâncias percorridas. Este procedimento foi descrito no Capítulo 4.

6.3.1 Alocação do Projeto Piloto

A primeira fase de resolução deste cenário consiste em alocar todos os pontos de recolha da zona do projeto piloto aos circuitos PaP de orgânicos em entidades considerados no estudo. Para isso, é aplicado o Módulo Avaliação, que avalia todos os circuitos PaP de Orgânicos em Entidades de acordo com espaço disponível, tempo disponível e distância aos PR do projeto piloto. Da aplicação de módulo são obtidos os circuitos originais O0601, O0802 e O0801, listados por ordem decrescente de atratividade, como os três circuitos mais atrativos para a alocação de PR do projeto piloto. Os demais circuitos originais foram também avaliados, embora estes três tenham sido suficientes para alocar todos os PR em estudo.

O Módulo Alocação foi então aplicado, expandindo estes três circuitos originais. Os números de pontos do projeto piloto alocados em cada circuito de orgânicos selecionado como mais atrativo na resolução do procedimento para o Cenário C estão resumidos na Tabela 13. Note-se que o circuito O0801, por ser o último circuito ao qual o Módulo Alocação afeta novos PR é expandido somente para 4 novos pontos de recolha, um resultado muito inferior aos outros dois circuitos.

Tabela 13 - Alocação de pontos de recolha do projeto piloto aos circuitos de orgânicos

| Circuitos Orgânicos Alterados | Número de PR originais | PR do projeto piloto alocados | Número de PR depois |
|--|---|--|--------------------------------------|
| <i>O0601</i> | 267 | 39 | 306 |
| <i>O0801</i> | 289 | 4 | 303 |
| <i>O0802</i> | 108 | 29 | 137 |

Naturalmente, de forma a equilibrar melhor a alocação dos novos pontos de recolha e o trabalho extra a efetuar durante a realização destes circuitos, poderiam ser aplicadas algumas alterações manuais a esta reconfiguração. Por exemplo, transferindo estrategicamente alguns pontos alocados aos circuitos O0601 e O0802 ao circuito O0801, uma vez que este ainda terá algum espaço e tempo disponível e só não “encheu” porque o algoritmo termina quando todos os PR do projeto piloto estão alocados. No entanto estas alterações teriam que ser efetuadas com o apoio de Sistemas de Informação Geográfica e com a CML, pelo que, não foram contempladas essas melhorias.

6.3.2 Resultados Obtidos para o Cenário C

Depois de expandidos os circuitos PaP de Orgânicos em Entidades, foram novamente aplicados os módulos de construção a todos os circuitos, tanto os que se mantiveram inalterados como os que foram expandidos. Desta forma, foram estabelecidas rotas, e tanto os tempos de realização como as distâncias percorridas pelos circuitos foram calculadas. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Tempos de realização das rotas dos circuitos para o Cenário C em horas

| Circuitos Orgânicos Reconfigurados | Tempo de recolha | Tempo de ligação | Tempo total |
|---|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| <i>Circuito O0301MK</i> | 4,451 | 1,482 | 5,933 |
| <i>Circuito O0401</i> | 7,071 | 1,560 | 8,631 |
| <i>Circuito O0403</i> | 6,211 | 1,669 | 7,880 |
| <i>Circuito O0404</i> | 3,901 | 3,196 | 7,097 |
| <i>Circuito O0601</i> | 5,500 | 2,646 | 8,146 |
| <i>Circuito O0801</i> | 4,072 | 2,970 | 7,042 |
| <i>Circuito O0802</i> | 3,881 | 1,603 | 5,484 |
| Total | 35,088 | 15,126 | 50,214 |

Tabela 15 - Distâncias percorridas para as rotas do Cenário C em metros

| Circuitos Mistos | Distância de recolha | Distância de ligação | Distância total |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <i>Circuito O0301MK</i> | 38505 | 35565 | 74070 |
| <i>Circuito O0401</i> | 61163 | 37450 | 98613 |
| <i>Circuito O0403</i> | 53725 | 40060 | 93785 |
| <i>Circuito O0404</i> | 33746 | 76701 | 110447 |
| <i>Circuito O0601</i> | 47573 | 63499 | 111072 |
| <i>Circuito O0801</i> | 35224 | 71273 | 106497 |
| <i>Circuito O0802</i> | 33572 | 38476 | 72048 |
| Total | 303508 | 363024 | 666532 |

É possível observar pelos resultados que o circuito original O401 estava já saturado, tendo o tempo de realização mais elevado de todos e superior à duração máxima aconselhável do turno. Esta situação poderá incorrer em custos adicionais com horas extra dos funcionários, custos estes não contemplados pela metodologia desenvolvida. Também o circuito expandido O0601 poderá ter este problema, embora possa ser facilmente resolvido com algumas alterações nas novas configurações.

Também se verifica alguma heterogeneidade nos resultados, tanto nos tempos de realização totais como nas distâncias percorridas. Este facto poderá ter a ver com alguma anomalia nas operações da CML e indica algum potencial de melhorias na reconfiguração dos circuitos para que não existam custos adicionais com horas extra de funcionários.

6.4 Resolução Cenário de Controlo

Para que seja possível comparar todos os cenários entre si, foram aplicados os módulos de construção de rotas a cada um dos circuitos originais estudados. Assim serão produzidas e avaliadas rotas originais que servirão de controlo para a confrontação de cenários. Na Tabela 16 é possível consultar os resultados dos tempos de realização em horas obtidos para todas as rotas originais e na Tabela 17 é possível consultar os resultados das distâncias percorridas em metros para as distâncias percorridas.

Tabela 16 - Tempos de realização das rotas dos circuitos originais em horas

| Circuitos Mistos | Tempo de recolha | Tempo de ligação | Tempo total |
|-------------------------|------------------|------------------|---------------|
| <i>Circuito O0301MK</i> | 4,294 | 1,482 | 5,775 |
| <i>Circuito O0401</i> | 7,032 | 1,433 | 8,465 |
| <i>Circuito O0403</i> | 6,127 | 1,519 | 7,646 |
| <i>Circuito O0404</i> | 3,946 | 3,098 | 7,0434 |
| <i>Circuito O0601</i> | 4,328 | 2,559 | 6,887 |
| <i>Circuito O0801</i> | 3,158 | 2,586 | 5,744 |
| <i>Circuito O0802</i> | 3,322 | 1,603 | 4,925 |
| <i>Circuito I0802MF</i> | 1,082 | 2,852 | 3,934 |
| <i>Circuito I0806</i> | 1,841 | 2,893 | 4,733 |
| <i>Circuito I0809</i> | 1,893 | 2,904 | 4,797 |
| <i>Circuito I0805</i> | 1,613 | 2,752 | 4,364 |
| Total | 38,634 | 25,679 | 64,313 |

Tabela 17 - Distâncias percorridas das rotas dos circuitos originais em metros

| Circuitos Originais | Distância de recolha | Distância de ligação | Distância total |
|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| <i>Circuito O0301MK</i> | 37131 | 35565 | 72696 |
| <i>Circuito O0401</i> | 60830 | 34383 | 95213 |
| <i>Circuito O0403</i> | 52996 | 36451 | 89447 |
| <i>Circuito O0404</i> | 34130 | 74357 | 108487 |
| <i>Circuito O0601</i> | 37435 | 61422 | 98857 |
| <i>Circuito O0801</i> | 27317 | 62071 | 89388 |
| <i>Circuito O0802</i> | 28736 | 38476 | 67212 |
| <i>Circuito I0802MF</i> | 9359 | 68445 | 77804 |
| <i>Circuito I0806</i> | 15924 | 69403 | 85327 |
| <i>Circuito I0809</i> | 16374 | 69685 | 86059 |
| <i>Circuito I0805</i> | 13948 | 66037 | 79985 |
| Total | 334186 | 616295 | 950481 |

Uma vez calculadas as rotas de controlo, e tirando partido do facto de existirem dados da CML com as distâncias percorridas pelos circuitos originais em 2018, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos pela aplicação dos módulos de construção aos circuitos originais com as distâncias percorridas em 2018 (Tabela 18). Esta comparação permite observar uma ligeira melhoria nas distâncias totais percorridas pelos circuitos. Esta melhoria indica um potencial de redução de custos para a CML e pode dever-se ao facto de que a CML não estabelece previamente rotas para a realização dos circuitos.

Tabela 18 - Comparação entre os resultados obtidos e os dados de 2018 da CML

| Circuitos Originais | Distância Média 2018 (km) | Distância Total Obtida (km) | Variação (%) |
|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| <i>Circuito O0301MK</i> | 88,6 | 72,7 | -22% |
| <i>Circuito O0401</i> | 101,2 | 95,2 | -6% |
| <i>Circuito O0403</i> | 97,5 | 89,5 | -9% |
| <i>Circuito O0404</i> | 96,4 | 108,5 | 11% |
| <i>Circuito O0601</i> | 106,6 | 98,9 | -8% |
| <i>Circuito O0801</i> | 92,5 | 89,4 | -3% |
| <i>Circuito O0802</i> | 72,8 | 67,2 | -8% |
| <i>Circuito I0802MF</i> | 74,5 | 77,8 | 4% |
| <i>Circuito I0806</i> | 104 | 85,3 | -22% |
| <i>Circuito I0809</i> | 79,2 | 86,0 | 8% |
| <i>Circuito I0805</i> | 88,5 | 80,0 | -11% |
| Média | 91,1 | 86,4 | -6% |

6.5 Confrontação Final dos Cenários

Numa confrontação final de cenário é necessário dividir essa confrontação nos dois fatores considerados nos objetivos, o fator económico e o fator organizacional.

Para comparar os custos dos três cenários foi necessário calcular as rotas de controlo. Essas rotas permitem que se some as distâncias para calcular o efeito da introdução do projeto piloto SGRU como um todo, relativamente aos três cenários, normalizando a distância total como indicador chave de desempenho.

Assim, para os cenários A e B, foram somadas as distâncias das rotas de controlo dos circuitos orgânicos. Os valores da distância e tempo total do Cenário C foram ajustados tendo em conta as distâncias que não serão percorridas nos circuitos que operam em Porta a Porta (PaP) Seletiva no Setor Doméstico, uma vez que essas distâncias serão já percorridas pelos circuitos PaP de Orgânicos em Entidades.

Tabela 19 - Comparação de Cenários

| | Distância Total Diária (km) | Tempo Total Diário (horas) |
|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Cenário A</i> | 945 | 64,645 |
| <i>Cenário B</i> | 934 | 64,632 |
| <i>Cenário C</i> | 952 | 68,602 |

É possível observar na Tabela 19 que o Cenário B verifica a menor distância total percorrida e simultaneamente o menor tempo despendido, pelo que, relativamente ao fator económico, é aquele que oferece melhores resultados. No entanto, as diferenças entre os três cenários é pouco significativa, pelo que, este fator por si só não será relevante para tomar uma decisão.

Tabela 20 - Resumo da análise dos cenários quanto ao fator organizacional

| | Cenário A | Cenário B | Cenário C |
|--------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------|
| Vantagens | Configuração mais intuitiva | Menores custos de implementação | Simplicidade |
| Desvantagens | Alterações ao calendário | Configuração menos intuitiva | Maiores custos |

A nível organizacional o Cenário A tem a vantagem de, a longo prazo, ter uma configuração mais intuitiva, uma vez que forma um novo circuito somente para os resíduos orgânicos. No entanto, o novo Circuito Piloto de Orgânicos, em comparação com os diversos circuitos analisados, têm uma dimensão reduzida referente ao número de PR, podendo implicar alguma ineficiência no uso dos recursos disponíveis e no equilíbrio da sua distribuição pelos circuitos reconfigurados. Este cenário têm como grande desvantagem a necessidade de reconfiguração dos circuitos no que toca aos calendários de recolha em vigor na cidade de Lisboa. A alteração dos calendários de recolha para a população residente poderá implicar custos de comunicação para informar a população residente das novas alterações, e consequentemente pode também sofrer uma grande resistência por parte dos moradores. Esta resistência poderá por em causa a correta remoção dos resíduos a reciclar nos dias pressupostos.

Quanto ao Cenário B, podemos constatar que a nível económico é o cenário que tem o melhor desempenho tanto a nível de distância percorrida como tempo de realização da rota. Na métrica conjunta destes dois indicadores, poderá ser considerado a opção mais favorável. A nível organizacional, no entanto, têm uma configuração pouco intuitiva devido aos circuitos mistos, e que poderá implicar custos adicionais devido à realização de, pelo menos, dois fretes obrigatórios para a recolha das duas fileiras de materiais distintos. Em situação normal, ao contrário daquilo que foi assumido, as produções diárias não são constantes, e pode acontecer nos outros cenários não terem que ser realizados dois fretes. Adicionalmente, poderá haver resistência por parte dos funcionários, devido aos possíveis tempos de realização acrescidos em dias que poderia não ser necessária a realização de dois fretes.

O Cenário C é o mais simples de implementar na prática, uma vez que só seriam alterados três circuitos originais em vez de quatro e a sua implementação implica apenas uma expansão dos circuitos atuais. Existe também um aproveitamento dos recursos já existentes, uma vez que alguns dos circuitos orgânicos não estão ainda saturados. No entanto, foi estimado como o cenário de maiores custos relativamente ao fator económico. A Tabela 20 resume as vantagens e desvantagens de cada um dos cenários de análise relativamente ao fator organizacional.

Capítulo 7 – Conclusões e Trabalho Futuro

7.1 Síntese e Conclusões

A presente dissertação foi realizada com o objetivo de estudar o problema proposto pela Câmara Municipal de Lisboa e as diferentes abordagens para o resolver. O problema consiste em incorporar a recolha de resíduos orgânicos no sector doméstico, mais precisamente um conjunto de 72 pontos de recolha na zona da Alta de Lisboa, ao atual Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos da cidade de Lisboa, de tal forma que sejam implementados com simplicidade – fator organizacional – e minimizando os custos adicionais – fator económico.

Para uma melhor perceção do problema, foram definidos os conceitos considerados relevantes, realizada uma descrição do enquadramento europeu e nacional em que se inserem os objetivos da CML, e ainda uma descrição detalhada do SGRU e as operações relevantes para o problema. Uma vez compreendido o problema em questão, a literatura relevante foi revista, de forma a seleccionar as melhores abordagens para a resolução do problema.

Foi apresentada uma abordagem inovadora, baseada em diversos procedimentos heurísticos do VRP, para lidar com aspetos particulares do problema. A mais importante particularidade é a acomodação de restrições relacionadas com diferentes fluxos de resíduos e uma forma diferente de lidar com restrições de capacidade, introduzindo fretes de descarga. A abordagem apresentada é desenvolvida dividindo o algoritmo em vários módulos, de forma a ser flexível o suficiente para acomodar três cenários distintos. Foi possível obter soluções admissíveis para os três cenários e por isso é possível concluir que a abordagem foi aplicada com sucesso.

Os resultados mostram que, tendo em conta o fator económico, o cenário B é o que apresenta melhor desempenho. No entanto, a nível organizacional, tem algumas limitações e poderá não ser a melhor opção. As vantagens e desvantagens de cada cenário são discutidas. Também se pode verificar que, aplicando os módulos de construção da metodologia desenvolvida para a definição de rotas é possível obter melhorias no sistema atual, com uma redução média de 6% da distância percorrida face aos dados de 2018. O atual SGRU não define rotas para os circuitos, pelo que a introdução de rotas seria, por si só, uma possível mais-valia.

O estudo apresenta uma análise limitada pelos dados fornecidos, muitas vezes incompletos ou com valores mal calibrados, podendo implicar alguma deficiência nos resultados obtidos. A taxa de apresentação de resíduos orgânicos para reciclagem também poderá representar uma limitação, uma vez que foi assumida como total para estudar o potencial máximo da recolha de RO. No entanto, estima-se que numa fase inicial seja bastante inferior e que evolua de acordo com uma taxa de adesão cada vez maior da população residente. Embora a heurística tenha produzido resultados admissíveis, é muito simplificada e conseqüentemente pouco sofisticada, pelo que, os resultados obtidos estarão significativamente longe da solução ótima.

O SGRU de Lisboa é muito complexo, heterogéneo e dinâmico, pelo que, as rotas sugeridas nas soluções deverão ser revistas frequentemente conforme a entrada ou saída de novas entidades e o sucesso das intervenções do Departamento de Comunicação na taxa de adesão da população à nova reciclagem de orgânicos.

7.2 Trabalho Futuro

O modelo desenvolvido apresenta algumas oportunidades de melhoria, que podem ser exploradas em investigação futura:

- Utilização de uma abordagem mais sofisticada na construção de rotas, como o VRP com múltiplas viagens, para lidar com os fretes de descarga. Esta é uma abordagem pouco desenvolvida no mundo científico, embora na prática, já existam muitos softwares empresariais que incluem esta modalidade.
- Desenvolver os módulos de construção considerando a possibilidade de realizar fretes sem ser apenas quando atinge a capacidade máxima.
- Sofisticar os modelos A e B. Aplicar ligeiras alterações aos circuitos, tendo em conta restrições organizacionais, por exemplo se dois circuitos tiverem o mesmo tipo de resíduos, operação e calendário, seria possível intercambiar pontos entre eles. Ou seja, aplicar um VRP para cada grupo de pontos com a mesma operação, tipo de resíduos e calendário.
- Aplicação dos módulos de construção desenvolvidos na metodologia para a definição de rotas nos circuitos da CML. Os resultados mostram que, embora não seja um algoritmo sofisticado e que produza soluções ótimas, são suficientes para melhor os custos individuais de realização dos circuitos.
- Realizar uma análise económica detalhada aos custos de implementação de cada um dos cenários, considerando as alterações estruturais ao sistema que serão necessárias. Neste caso podemos incluir por exemplo os custos de comunicação, ou imputar custos à dificuldade de alterar os hábitos das tripulações e ainda desenvolver indicadores de desempenho para situações semelhantes.
- Estudar o impacto da evolução temporal da taxa de apresentação de resíduos orgânicos para reciclagem, isto é, da taxa de adesão da população.

É possível verificar que seria vantajoso estudar e otimizar todo o sistema de Lisboa, devido a alguma desorganização nos circuitos atuais, uma vez que existem muitas oportunidades de melhoria nas operações.

Bibliografia

- Alfa, A. S., Heragu, S. S. and Chen, M. (1991) 'A 3-OPT Based Simulated Annealing Algorithm for Vehicle Routing Problems', *Computers and Industrial Engineering*, 21(1–4), pp. 635–639. doi: 10.1016/0360-8352(91)90165-3.
- Altinkemer, K. and Gavish, B. (1991) 'Parallel Savings Based Heuristics for the Delivery Problem', *Operations Research*, 39(3), pp. 456–469. doi: 10.1287/opre.39.3.456.
- Antes, J. and Derigs, U. (1995) 'A New Parallel Tour Construction Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows'.
- Applegate, D. L. *et al.* (2009) 'Certification of an optimal TSP tour through 85,900 cities', *Operations Research Letters*. Elsevier B.V., 37(1), pp. 11–15. doi: 10.1016/j.orl.2008.09.006.
- Badeau, P. *et al.* (1997) 'A Parallel Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(2), pp. 109–122. doi: 10.1016/S0968-090X(97)00005-3.
- Baker, B. M. and Ayechev, M. (2003) 'A genetic algorithm for the vehicle routing problem', *Computers and Operations Research*, 30(5), pp. 787–800. doi: 10.1016/S0305-0548(02)00051-5.
- Baker, B. M. and Sheasby, J. (1999) 'Extensions to the generalised assignment heuristic for vehicle routing', *European Journal of Operational Research*, 119(1), pp. 147–157. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00348-8.
- Baker, E. K. and Schaffer, J. R. (1986) 'Solution Improvement Heuristics for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints', *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 6(3–4), pp. 261–300. doi: 10.1080/01966324.1986.10737197.
- Baldacci, R., Christofides, N. and Mingozzi, A. (2008) 'An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts', *Mathematical Programming*, 115(2), pp. 351–385. doi: 10.1007/s10107-007-0178-5.
- Baptista, S., Oliveira, R. C. and Zúquete, E. (2002) 'Discrete Optimization - A period vehicle routing case study', *European Journal of Operational Research*, 139, pp. 220–229.
- Beasley, J. (1983) 'Route first-Cluster second methods for vehicle routing', *Omega*, 11(4), pp. 403–408. doi: 10.1016/0305-0483(83)90033-6.
- Beltrami, E. J. and Bodin, L. D. (1974) 'Networks and vehicle routing for municipal waste collection', *Networks*, 4(1), pp. 65–94. doi: 10.1002/net.3230040106.
- Berger, J., Barkaoui, M. and Bräysy, O. (2003) 'A route-directed hybrid genetic approach for the vehicle routing problem with time windows', *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 41(2), pp. 179–194. doi: 10.1080/03155986.2003.11732675.
- Bertsimas, D. J. and Simchi-Levi, D. (1996) 'A New Generation of Vehicle Routing Research: Robust Algorithms, Addressing Uncertainty', *Operations Research*, 44(2), pp. 286–304. doi: 10.1287/opre.44.2.286.
- Braekers, K., Ramaekers, K. and Van Nieuwenhuyse, I. (2016) 'The vehicle routing problem: State of the art classification and review', *Computers and Industrial Engineering*. Elsevier Ltd, 99, pp. 300–313. doi: 10.1016/j.cie.2015.12.007.
- Bramel, J. and Simchi-Levi, D. (1995) 'A Location Based Heuristic for General Routing Problems', *Operations Research*, 43(4), pp. 649–660.
- Bräysy, O. (2002) 'Fast Local Searches for the Vehicle Routing Problem with Time Windows', *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 40(4), pp. 319–330. doi: 10.1080/03155986.2002.11732660.

- Bräysy, O. (2003) 'A Reactive Variable Neighborhood Search for the Vehicle-Routing Problem with Time Windows', *INFORMS Journal on Computing*, 15(4), pp. 347–368. doi: 10.1287/ijoc.15.4.347.24896.
- Bräysy, O. and Gendreau, M. (2002) 'Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows', *Sociedad de Estadística e Investigación Operativa*, 10(2), pp. 211–237.
- Bräysy, O. and Gendreau, M. (2005a) 'Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms', *Transportation Science*, 39(1), pp. 104–118. doi: 10.1287/trsc.1030.0056.
- Bräysy, O. and Gendreau, M. (2005b) 'Vehicle routing problem with time windows, Part II: Metaheuristics', *Transportation Science*, 39(1), pp. 119–139. doi: 10.1287/trsc.1030.0057.
- Breedam, A. Van (1995) 'Improvement heuristics for the Vehicle Routing Problem based on Simulated Annealing', *European Journal of Operational Research*, 86(1979), pp. 480–490. Available at: https://ac-els-cdn-com.dianus.libr.tue.nl/037722179400064J/1-s2.0-037722179400064J-main.pdf?_tid=79d3e65d-ba62-48e7-bbaf-cdaff33791d0&acdnat=1530181994_60e2753ac429e3a38c17ed413abd7c22.
- Van Breedam, A. (2001) 'Comparing descent heuristics and metaheuristics for the vehicle routing problem', *Computers and Operations Research*, 28(4), pp. 289–315. doi: 10.1016/S0305-0548(99)00101-X.
- Bullnheimer, B., Hartl, R. F. and Strauss, C. (1999) 'An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem', *Annals of Operations Research*, 89, pp. 319–328. doi: 10.1.1.49.1415.
- Câmara Municipal Lisboa (2016) *Plano Municipal de Gestão de Resíduos do Município de Lisboa | 2015-2020*.
- Campbell, A. M. and Wilson, J. H. (2014) 'Forty Years of Periodic Vehicle Routing', *Networks*, 63(1), pp. 2–15. doi: 10.1002/net.
- Carter, M. W. et al. (1996) 'Solving An Integrated Logistics Problem Arising In Grocery Distribution', *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 34(4), pp. 290–306. doi: 10.1080/03155986.1996.11732310.
- Chao, I. -M, Golden, B. L. and Wasil, E. (1995) 'An Improved Heuristic for the Period Vehicle Routing Problem', *Networks*, 26(1), pp. 25–44. doi: 10.1002/net.3230260104.
- Chiang, W. C. and Russell, R. A. (1997) 'A Reactive Tabu Search Metaheuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows', *INFORMS Journal on Computing*, 9(4), pp. 417–430. doi: 10.1287/ijoc.9.4.417.
- Christofides, N. and Beasley, J. E. (1984) 'The period routing problem', *Networks*, 14(2), pp. 237–256. doi: 10.1002/net.3230140205.
- Christofides, N., Mingozzi, A. and Toth, P. (1981) 'State-space relaxation procedures for the computation of bounds to routing problems', *Networks*, 11(2), pp. 145–164. doi: 10.1002/net.3230110207.
- Clarke, G. and Wright, J. W. (1964) 'Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points', *Operations Research*, 12(4), pp. 568–581. doi: 10.1287/opre.12.4.568.
- Cordeau, J.-F. et al. (2005) 'New Heuristics for the Vehicle Routing Problem', in Langevin, A. and Riopel, D. (eds) *Logistics Systems: Design and Optimization*. Springer. Boston, MA, pp. 279–297.
- Cordeau, J.-F., Gendreau, M. and Laporte, G. (1997) 'A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems', *Networks*, 30(10), pp. 105–119.
- Cordeau, J. F. et al. (2002) 'A guide to vehicle routing heuristics', *Journal of the Operational Research Society*, 53(5), pp. 512–522. doi: 10.1057/palgrave.jors.2601319.
- Cordeau, J. F. et al. (2007) 'Vehicle Routing', in *Handbooks in Operations Research and Management Science*, pp. 367–428. doi: 10.1016/S0927-0507(06)14006-2.

- Cordeau, J. F., Laporte, G. and Mercier, A. (2001) 'A Unified Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows', *Journal of Operational Research Society*, 52(8), pp. 928–936.
- Cordeau, J. F. and Maischberger, M. (2012) 'A parallel iterated tabu search heuristic for vehicle routing problems', *Computers and Operations Research*, 39(9), pp. 2033–2050. doi: 10.1016/j.cor.2011.09.021.
- Cordone, R. and Calvo, R. W. (2001) 'A Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows', *Journal of Heuristics*, 7, pp. 107–129. doi: 10.1007/978-3-319-20430-7_10.
- Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959) 'The Truck Dispatching Problem', *Management Science*, 6(1), pp. 80–91. doi: 10.1287/mnsc.6.1.80.
- Drummond, L. M. A., Ochi, L. S. and Vianna, D. S. (2001) 'Asynchronous parallel metaheuristic for the period vehicle routing problem', *Future Generation Computer Systems*, 17(4), pp. 379–386. doi: 10.1016/S0167-739X(99)00118-1.
- Eiselt, H. A., Gendreau, M. and Laporte, G. (1995a) 'Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem', *Operations Research*, 43(2), pp. 231–242. doi: 10.1287/opre.43.2.231.
- Eiselt, H. A., Gendreau, M. and Laporte, G. (1995b) 'Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem', *Operations Research*, 43(3), pp. 399–414. doi: 10.1287/opre.43.3.399.
- Eksioglu, B., Vural, A. V. and Reisman, A. (2009) 'The vehicle routing problem: A taxonomic review', *Computers and Industrial Engineering*. Elsevier Ltd, 57(4), pp. 1472–1483. doi: 10.1016/j.cie.2009.05.009.
- El-Sherbeny, N. A. (2010) 'Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods', *Journal of King Saud University - Science*. Japanese Association for Dental Science, 22(3), pp. 123–131. doi: 10.1016/j.jksus.2010.03.002.
- Ergun, Ö., Orlin, J. B. and Steele-Feldman, A. (2006) 'Creating very large scale neighborhoods out of smaller ones by compounding moves', *Journal of Heuristics*, 12(1–2), pp. 115–140. doi: 10.1007/s10732-006-5561-5.
- European Environment Agency (EEA) (2016) *Circular economy in Europe - Developing the knowledge base*.
- Feo, T. A. and Resende, M. G. C. (1995) 'Greedy Randomized Adaptive Search Procedure', *Journal of Global Optimization*, 6, pp. 109–133. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/b101874>.
- Feo, T. A., Resende, M. G. C. and Smith, S. H. (1994) 'A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Maximum Independent Set', *Operations Research*, 42(5), pp. 860–878. doi: 10.1287/opre.42.5.860.
- Fisher, M. L. and Jaikumar, R. (1981) 'A generalized assignment heuristic for vehicle routing', *Networks*, 11(2), pp. 109–124. doi: 10.1002/net.3230110205.
- Flood, M. M. (1956) 'The traveling-salesman problem', *Operations Research*, 4(1), pp. 61–75.
- Fukasawa, R. et al. (2006) 'Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem', *Mathematical Programming*, 106(3), pp. 491–511. doi: 10.1007/s10107-005-0644-x.
- Gambardella, L. M., Taillard, E. and Agazzi, G. (1999) *MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows*. Available at: <http://www.idsia.ch>.
- Garcia, B.-L., Potvin, J.-Y. and Rousseau, J.-M. (1994) 'APparallel Implementation of the Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Window Constraints', *Computers and Operations Research*, 21(9), pp. 1025–1033. doi: 10.1016/0305-0548(94)90073-6.
- Gehring, H. and Homberger, J. (2002) 'Parallelization of a Two-Phase Metaheuristic for Routing Problems with Time Windows', *Journal of Heuristics*, 8, pp. 251–276.

- Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte, G. (1994) 'A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem', *Management Science*, 40(10), pp. 1276–1290. doi: 10.1287/trsc.31.2.170.
- Gendreau, M., Laporte, G. and Potvin, J.-Y. (2011) 'Metaheuristics for the Capacitated VRP', in *The Vehicle Routing Problem*, pp. 129–154. doi: 10.1137/1.9780898718515.ch6.
- Ghiani, G. *et al.* (2014) 'Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues', *Computers and Operations Research*. Elsevier, 44, pp. 22–32. doi: 10.1016/j.cor.2013.10.006.
- Gilbert, I. H. L. and Osman (1995) 'Routing problems: A bibliography', *Annals of Operations Research*, 61, pp. 227–262. doi: 10.1007/BF02098290.
- Gillet, B. E. and Miller, L. R. (1974) 'A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem', *Operations Research*, 22(Augus2t 2015), pp. 340–349. doi: 10.1145/123186.123303.
- Glover, F. (1986) 'Future paths for integer programming and links to artificial intelligence', *Computers and Operations Research*, 13(5), pp. 533–549. doi: 10.1016/0305-0548(86)90048-1.
- Glover, F. and Laguna, M. (1998) 'Tabu Search', *Handbook of Combinatorial Optimization*, 3, pp. 621–757. Available at: <http://ci.nii.ac.jp/naid/110003936156/>.
- Golden, B. L., Magnanti, T. L. and Nguyen, H. Q. (1977) 'Implementing vehicle routing algorithms', *Networks*, 7(2), pp. 113–148. doi: 10.1002/net.3230070203.
- Goncalves, L. B., Ochi, L. S. and Martins, S. L. (2005) 'A GRASP with Adaptive Memory for a Period Vehicle Routing Problem', pp. 721–727. doi: 10.1109/cimca.2005.1631349.
- Haimovich, M. and Rinnooy Kan, A. H. G. (1985) 'Bounds and Heuristics for Capacitated Routing Problems', *Mathematics of Operations Research*, 10(4), pp. 527–542. doi: 10.1287/moor.10.4.527.
- Hansen, P. and Mladenović, N. (1997) 'Variable Neighbourhood Search', *Computers and Operations Research*, 24(11), pp. 1097–1100. doi: 10.4114/ia.v7i19.717.
- Hemmelmayr, V. C., Doerner, K. F. and Hartl, R. F. (2009) 'A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems', *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 195(3), pp. 791–802. doi: 10.1016/j.ejor.2007.08.048.
- Holland, J. H. (1975) 'Adaptation in Natural and Artificial Systems', *Ann Arbor: The University of Michigan Press*.
- Homberger, J. and Gehring, H. (1999) 'Two Evolutionary Metaheuristics For The Vehicle Routing Problem With Time Windows', *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 37(3), pp. 297–318. doi: 10.1080/03155986.1999.11732386.
- Homberger, J. and Gehring, H. (2005) 'A two-phase hybrid metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows', *European Journal of Operational Research*, 162(1), pp. 220–238. doi: 10.1016/j.ejor.2004.01.027.
- Ioannou, G., Kritikos, M. and Prastacos, G. (2001) 'A greedy look-ahead heuristic for the vehicle routing problem with time windows', *Journal of the Operational Research Society*, 52(5), pp. 523–537. doi: 10.1057/palgrave.jors.2601113.
- Jang, W. *et al.* (2006) 'The Missouri Lottery Optimizes Its Scheduling and Routing to Improve Efficiency and Balance', *Interfaces*, 36(4), pp. 302–313. doi: 10.1287/inte.1060.0204.
- Kaza, S. *et al.* (2018) *What a Waste 2.0 - A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank, *Urban Development*. World Bank, Washington, DC. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983) 'Optimization by Simulated Annealing', *Science*, 220(4598), pp. 671–680. doi: 10.1142/9789812799371.
- Kontoravdis, G. and Bard, J. F. (1995) 'A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows', *ORSA Journal on Computing*, 7(1), pp. 10–23. doi: 10.1287/ijoc.7.1.10.

- Kytöjoki, J. *et al.* (2007) 'An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems', *Computers and Operations Research*, 34(9), pp. 2743–2757. doi: 10.1016/j.cor.2005.10.010.
- Laporte, G. (1992) 'The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms', *European Journal of Operational Research*, 59, pp. 345–358.
- Laporte, G. (2007) 'What You Should Know about the Vehicle Routing Problem', *Naval Research Logistics*, 54, pp. 811–819. doi: 10.1002/nav.
- Laporte, G. (2009) 'Fifty Years of Vehicle Routing', *Transportation Science*, 43(4), pp. 408–416. doi: 10.1287/trsc.1090.0301.
- Lin, S. (1965) 'Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem', *Bell System Technical Journal*, 44(10), pp. 2245–2269. doi: 10.1002/j.1538-7305.1965.tb04146.x.
- Lin, S. and Kernighan, B. W. (1973) 'An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem', *Operations Research*, 21, pp. 498–516.
- Matos, A. C. (1996) *Optimização de um Sistema de Recolha de Resíduos Sólidos*. Instituto Superior Técnico.
- Matos, A. C. and Oliveira, R. C. (2004) 'An Experimental Study of the Ant Colony System for the Period Vehicle Routing Problem', in *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, pp. 286–293. doi: 10.1007/978-3-540-28646-2_26.
- Mole, R. H. and Jameson, S. R. (1976) 'A Sequential Route-Building Algorithm Employing a Generalised Savings Criterion', *Operational Research Quarterly*, 27(2), pp. 503–511. doi: 10.2307/3008819.
- Mostafa, S. A. *et al.* (2017) 'Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution', *Journal of Computational Science*. Elsevier B.V., 21, pp. 255–262. doi: 10.1016/j.jocs.2017.04.003.
- Nelson, M. D. *et al.* (1985) 'Implementation techniques for the vehicle routing problem', *Computers and Operations Research*, 12(3), pp. 273–283. doi: 10.1016/0305-0548(85)90026-7.
- Nobert, Y. and Laporte, G. (1987) 'Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem', *North-Holland Mathematics Studies*, 132, pp. 147–184. doi: 10.1016/S0304-0208(08)73235-3.
- Ombuki, B., Ross, B. J. and Hanshar, F. (2006) 'Multi-Objective Genetic Algorithms for Vehicle Routing with Time Windows', *Applied Intelligence*, 24, pp. 17–30. Available at: http://pdf.aminer.org/000/265/118/rule_coding_for_genetic_algorithms_an_alternative_solution_to_the.pdf.
- Osman, I. H. (1993) 'Metastrategy simulated annealing and tabu search for combinatorial optimization problems.', *Annals of Operations Research*, 41, pp. 421–451. Available at: <http://hdl.handle.net/10044/1/7596>.
- Paessens, H. (1988) 'The savings algorithm for the vehicle routing problem', *European Journal of Operational Research*, 34(3), pp. 336–344. doi: 10.1016/0377-2217(88)90154-3.
- Pecin, D. *et al.* (2017) 'Improved branch-cut-and-price for capacitated vehicle routing', *Mathematical Programming Computation*. Springer Berlin Heidelberg, 9(1), pp. 61–100. doi: 10.1007/s12532-016-0108-8.
- Pires, A. *et al.* (2018) *Optimization in Waste Collection to Reach Sustainable Waste Management, Sustainable Solid Waste Collection and Management*. doi: 10.1007/978-3-319-93200-2_12.
- Pirkwieser, S. and Raidl, G. R. (2010) 'Multilevel Variable Neighborhood Search for Periodic Routing Problems', in Cowling, P. and Merz, P. (eds) *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer, pp. 226–238. doi: 10.1007/978-3-642-12139-5-20.
- Pisinger, D. and Ropke, S. (2007) 'A general heuristic for vehicle routing problems', *Computers and Operations Research*, 34(8), pp. 2403–2435. doi: 10.1016/j.cor.2005.09.012.

- Potvin, J.-Y. and Rousseau, J.-M. (1993) 'A Parallel Route Building Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows', *European Journal of Operational Research*, 66, pp. 331–340.
- Potvin, J. Y. and Rousseau, J.-M. (1995) 'An Exchange Heuristic for Routeing Problems with Time Windows', *Journal of the Operational Research Society*, 46, pp. 1433–1446. Available at: <http://www.jstor.org/stable/3009290>.
- Ramos, T. R. P. and Oliveira, R. C. (2011) 'Delimitation of service areas in reverse logistics networks with multiple depots', *Journal of the Operational Research Society*. Nature Publishing Group, 62(7), pp. 1198–1210. doi: 10.1057/jors.2010.83.
- Rego, C. (1998) 'A Subpath Ejection Method for the Vehicle Routing Problem', *Management Science*, 44(10), pp. 1447–1459.
- Reimann, M., Doerner, K. and Hartl, R. F. (2004) 'D-ants: Savings based ants divide and conquer the vehicle routing problem', *Computers and Operations Research*, 31(4), pp. 563–591. doi: 10.1016/S0305-0548(03)00014-5.
- Renaud, J., Boctor, F. F. and Laporte, G. (1996) 'An Improved Petal Heuristic for the Vehicle Routeing Problem', *Journal of the Operational Research Society*, 47, pp. 329–336. Available at: <http://www.jstor.org/stable/3009290>.
- Resende, M. G. C. and Ribeiro, C. C. (2003) 'Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: Advances, Hybridizations, and Applications', in Gendreau, M. and Potvin, J.-Y. (eds) *Handbook of Metaheuristics*, pp. 283–319. doi: 10.1007/b101874.
- Rochat, Y. and Taillard, É. D. (1995) 'Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing', *Journal of Heuristics*, 1(1), pp. 147–167. doi: 10.1007/BF02430370.
- Russell, R. A. (1977) 'Technical Note—An Effective Heuristic for the M-Tour Traveling Salesman Problem with Some Side Conditions', *Operations Research*, 25(3), pp. 517–524. doi: 10.1287/opre.25.3.517.
- Russell, R. A. (1995) 'Hybrid Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows', *Transportation Science*, 29(2), pp. 156–166. doi: 10.1287/trsc.29.2.156.
- Russell, R. A. and Gribbin, D. (1991) 'A Multiphase Approach to the Period Routing Problem', *Networks*, 21(7), pp. 747–765. doi: 10.1002/net.3230210704.
- Russell, R. and Igo, W. (1979) 'An assignment routing problem', *Networks*, 9(1), pp. 1–17. doi: 10.1002/net.3230090102.
- Ryan, D. M., Hjorring, C. and Glover, F. (1993) 'Extensions of the Petal Method for Vehicle Routeing', *The Journal of the Operational Research Society*, 44(3), pp. 289–296. doi: 10.2307/2584199.
- Savelsbergh, M. W. P. (1985) 'Local Search in Routing Problems with Time Windows', *Annals of Operations Research*, 4, pp. 285–305.
- Savelsbergh, M. W. P. (1990) 'An efficient implementation of local search algorithms for constrained routing problems', *European Journal of Operational Research*, 47(1), pp. 75–85. doi: 10.1016/0377-2217(90)90091-O.
- Savelsbergh, M. W. P. (1992) 'The Vehicle Routing Problem with Time Windows: Minimizing Route Duration', *ORSA Journal on Computing*, 4(2), pp. 146–154. doi: 10.1287/ijoc.4.2.146.
- Schulze, J. and Fahle, T. (1999) 'A Parallel Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Window Constraints', *Annals of Operations Research*, 86, pp. 585–607.
- Solomon, M. M. (1987) 'Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints', *Operations Research*, 35(2), pp. 254–265. doi: 10.1287/opre.35.2.254.
- Solomon, M. M. and Desrosiers, J. (1988) 'Survey Paper - Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems', *Transportation Science*, 22(1), pp. 1–13. doi: 10.1287/trsc.22.1.1.

- Soltani, A. *et al.* (2015) 'Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: A review', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 35, pp. 318–328. doi: 10.1016/j.wasman.2014.09.010.
- Taillard, E. (1993) 'Parallel iterative Search Methods for Vehicle Routing Problems', *Networks*, 23, pp. 661–673.
- Tan, C. C. R. and Beasley, J. E. (1984) 'A Heuristic Algorithm for the Period Vehicle Routing Problem', *Omega*, 12(5), pp. 497–504. doi: 10.1016/0305-0483(84)90050-1.
- Teixeira, J., Antunes, A. P. and De Sousa, J. P. (2004) 'Recyclable Waste Collection Planning - a case study', *European Journal of Operational Research*, 158(3), pp. 543–554. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00379-5.
- Teixeira, J. C. (2002) *Planeamento de Rotas de Recolha de Resíduos Sólidos Recicláveis*. Universidade do Porto.
- Thompson, P. M. and Psaraftis, H. N. (1993) 'Cyclic Transfer Algorithm for Multivehicle Routing and Scheduling Problems', *Operations Research*, 41(5), pp. 935–946. doi: 10.1287/opre.41.5.935.
- Toth, P. and Vigo, D. (2002) 'Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem', *Discrete Applied Mathematics*, 123, pp. 487–512.
- Toth, P. and Vigo, D. (2003) 'The Granular Tabu Search and Its Application to the Vehicle-Routing Problem', *INFORMS Journal on Computing*, 15(4), pp. 333–346. doi: 10.1287/ijoc.15.4.333.24890.
- Valorsul (2016) *Caderno de Sustentabilidade 2016*. Lisboa.
- Valorsul (2018) *O Ciclo dos Resíduos Orgânicos*. Available at: <http://www.valorsul.pt/pt/seccao/areas-de-negocio/valorizacao-organica/programa-valor>.
- Vidal, T. *et al.* (2012) 'A Hybrid Genetic Algorithm for Multidepot and Periodic Vehicle Routing Problems', *Operations Research*, 60(3), pp. 611–624. doi: 10.1287/opre.1120.1048.
- Wark, P. and Holt, J. (1994) 'A Repeated Matching Heuristic for the Vehicle Routeing Problem', *Journal of the Operational Research Society*, 45(10), pp. 1156–1167. Available at: <http://www.jstor.org/stable/3009290>.
- Wren, A. and Holliday, A. (1972) 'Computer Scheduling of Vehicles From One or More Depots To a Number of Delivery Points.', *Operational Research Quarterly*, 23(3), pp. 333–344. doi: 10.1057/jors.1972.53.
- Yu, B., Yang, Z. Z. and Yao, B. (2009) 'An improved ant colony optimization for vehicle routing problem', *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 196(1), pp. 171–176. doi: 10.1016/j.ejor.2008.02.028.

