

BRUNO GAGO PIRES ESPANHA

**OTIMIZAÇÃO DOS CIRCUITOS DE RECOLHA DE
RESÍDUOS URBANOS INDIFERENCIADOS NO
CONCELHO DE SILVES**



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

2020

BRUNO GAGO PIRES ESPANHA

**OTIMIZAÇÃO DOS CIRCUITOS DE RECOLHA DE
RESÍDUOS URBANOS INDIFERENCIADOS NO
CONCELHO DE SILVES**

Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Luís Nunes



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Faculdade de Ciências e Tecnologia

2020

OTIMIZAÇÃO DOS CIRCUITOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS URBANOS INDIFERENCIADOS NO CONCELHO DE SILVES

Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Bruno Gago Pires Espanha

©Copyright Bruno Gago Pires Espanha

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e incentivo de várias pessoas, às quais gostaria de dar o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Dr. Luís Nunes, pela orientação, motivação e disponibilidade que sempre demonstrou ao longo da realização desta dissertação.

Agradeço de modo geral à Câmara Municipal de Silves, especialmente ao Engenheiro Pedro Coelho por ter proposto a realização deste trabalho e ao técnico superior José Pinto por toda a informação disponibilizada e pela disponibilidade demonstrada do primeiro ao último dia.

Aos meus pais, pela paciência, por me terem apoiado sempre, incondicionalmente, por acreditarem em mim e por me terem proporcionado condições para que pudesse completar este percurso, tendo noção que sem eles nada disto seria possível.

À minha namorada, Lara, por todo o apoio e incentivo que sempre me deu, servindo sempre de porto seguro e tornando esta etapa mais fácil.

Por último, mas não menos importante, a todos os meus amigos, que mesmo sem terem noção, contribuíram de certa forma para a conclusão desta etapa.

A todos, um enorme obrigado.

RESUMO

A otimização de rotas de veículos têm-se revelado importante em diversas áreas, desde a recolha de resíduos à entrega de correio, por exemplo. Os vários estudos já realizados mostram que é possível melhorar sistemas já implantados, com recurso a diferentes algoritmos e métodos computacionais. A abordagem deste problema direcionado à recolha de resíduos urbanos já demonstrou serem possíveis poupanças significativas, tanto financeiramente como em redução de tempo por percurso.

Posto isto, surgiu a proposta da Câmara Municipal de Silves em otimizar o atual sistema de recolha de resíduos urbanos, tendo em conta os vários percursos estabelecidos no concelho.

Este relatório apresenta então o trabalho desenvolvido no âmbito da otimização de circuitos de recolha de resíduos, aplicado ao concelho de Silves.

Usou-se como ferramenta uma extensão do *ArcGIS*, designada *Network Analyst*. Foram obtidos circuitos para toda a área de estudo, sendo que o foco da otimização foram os circuitos de resíduos indiferenciados destinados a recolher contentores de superfície.

Foram modelados dois cenários que geraram diferentes percursos, com base em vários pressupostos inicialmente estabelecidos para a otimização. Ainda foi simulado um terceiro cenário que avaliava as consequências dum presumível aumento na quantidade de resíduos a recolher, de forma a perceber até que ponto o sistema otimizado seria resiliente à mudança.

Palavras-chave: Análise de redes, Circuitos de recolha de resíduos, Otimização de circuitos, *Network Analyst*, *Vehicle Routing Problem*.

ABSTRACT

The vehicle routing optimization has proven to be important in many areas, from waste collecting to mail delivery, for example. A couple of studies already carried out show that it is possible to improve already deployed systems, using different algorithms and computational methods. The approach to this problem, aimed to urban waste collection, has already shown that significant savings are possible, both financially and in reducing journey time.

Hereupon, the proposal of Câmara Municipal de Silves arose to optimize the current urban waste collection system, considering the several routes established in the municipality.

This exposition presents the work developed within the scope of the waste collecting routes optimization, applied to the municipality of Silves.

An *ArcGIS* extension, called *Network Analyst*, was used as tool. Routes were obtained for the whole study area, with the focus on the optimization process being the undifferentiated waste routes which collect specifically surface containers.

Based on several assumptions initially established for the optimization, two scenarios were modeled which generated different routes. A third scenario was also simulated to evaluate the consequences of a presumed increase in the amount of waste to be collected, in order to understand how resilient the optimized system would be to change.

Keywords: Network analysis, Waste collecting routes, Routes optimization, *Network Analyst*, *Vehicle Routing Problem*.

ÍNDICE

Resumo	i
Abstract	ii
Lista de siglas	viii
1 Enquadramento e objetivos	1
2 Revisão bibliográfica	2
2.1 Problemática dos resíduos	2
2.2 Gestão Integrada de Resíduos	3
2.3 Otimização de circuitos de recolha de resíduos	4
2.4 Análise de Redes	5
2.5 Problemas Clássicos de Percursos	7
2.5.1 Problema do Caixeiro-Viajante	7
2.5.2 Problema de Múltiplos Caixeiros-Viajantes	8
2.5.3 Problema de Rotas de Veículos	8
2.5.4 Problema do Carteiro Chinês	9
2.5.5 Soluções para os problemas de percursos de veículos	10
2.6 Trabalhos de otimização em sistemas de recolha de resíduos	11
3 Metodologia	16
3.1 Algoritmo de <i>Dijkstra</i>	16
3.2 Pesquisa Tabu	18
3.3 Network Analyst	18
3.4 Rede viária	20
3.4.1 Atributos da rede viária	20
3.5 Preparação dos atributos dos contentores	23
3.6 Preparação Da Network Dataset	26
3.7 Network Locations	27
3.8 Pressupostos assumidos	29

4	Estudo de caso: concelho de Silves	31
4.1	Assimetrias – sazonalidade e desertificação	32
4.2	População.....	33
4.3	Resíduos Sólidos Urbanos no concelho	34
4.4	Sistema de recolha e contentorização do concelho	35
5	Resultados e discussão.....	39
5.1	Cenário 1	39
5.2	Cenário 2	52
5.3	Cenário 3	65
5.4	Discussão de resultados.....	70
6	Considerações finais.....	75
	Referências Bibliográficas.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Grafo representando uma rede (Bronson & Naadimuthu, 2001).....	6
Figura 3.1 - Exemplo de aplicação do algoritmo de Dijkstra (Karadimas et al.,2007)....	17
Figura 3.2 - Representação de passagens desniveladas (Adaptado de Salgado, 2020).	22
Figura 3.3 - Parte da rede viária do concelho, representada no programa ArcGIS	23
Figura 3.4 - Aproximação do veículo ao contentor: ambos os lados (Silva, 2009)	24
Figura 3.5 - Aproximação do veículo ao contentor: lado direito do veículo (Silva, 2009)	24
Figura 3.6 - Aproximação do veículo ao contentor: lado esquerdo do veículo (Silva, 2009)	24
Figura 3.7 - Feature classes da Network Dataset criada	26
Figura 3.8 - Conectividade da rede.....	26
Figura 3.9 - Atribuição dos campos que indicam passagens desniveladas.....	27
Figura 3.10 - Atributos utilizados na rede criada	27
Figura 3.11 - Atribuição de variáveis na classe orders das Network Locations	28
Figura 3.12 - Localização dos depots, no contexto geral do concelho.....	28
Figura 3.13 - Atributos por percurso	29
Figura 4.1 - Localização do concelho de Silves (Visitar Portugal, 2018).....	31
Figura 4.2 - Caracterização demográfica do concelho de Silves (CMS, 2016).....	33
Figura 4.3 - Evolução das quantidades recolhidas em toneladas, no concelho de Silves, de 2014 a 2018 (FFMS, 2020)	34
Figura 4.4 - Contentores de superfície: 110, 120, 800 e 1100 litros (Google, 2020).	35
Figura 4.5 - Contentores enterrados: Sotkon de 3000 litros e Molok de 3000 e 5000 litros (Google, 2020)	36
Figura 4.6 - Distribuição dos equipamentos de deposição pelo concelho.....	36

Figura 5.1 – Circuitos de Algoz/Tunes otimizados pelo cenário 1.....	40
Figura 5.2 - Circuitos de Messines otimizados pelo cenário 1	42
Figura 5.3 - Circuitos de S. Marcos otimizados pelo cenário 1.....	43
Figura 5.4 - Circuitos de Armação otimizados pelo cenário 1 – simulação 1.....	45
Figura 5.5 - Circuitos de segunda e terça em Armação otimizados pelo cenário 1	46
Figura 5.6 - Circuitos de quarta/sexta e quinta/sábado em Armação otimizados pelo cenário 1	47
Figura 5.7 - Circuitos de segunda, terça e quarta-feira em Silves otimizados pelo cenário 1	48
Figura 5.8 - Circuitos de quinta, sexta e sábado em Silves otimizados pelo cenário 1 ..	49
Figura 5.9 - Solução questionável no cenário 1.....	51
Figura 5.10 - Solução otimizada no cenário 2	53
Figura 5.11 - Circuitos de Algoz/Tunes otimizados pelo cenário 2	54
Figura 5.12 - Circuitos de Messines otimizados pelo cenário 2	56
Figura 5.13 - Circuitos de S. Marcos otimizados pelo cenário 2.....	57
Figura 5.14 - Circuitos de segunda e terça em Armação otimizados pelo cenário 2	59
Figura 5.15 - Circuitos de quarta/sexta e quinta/sábado em Armação otimizados pelo cenário 2	60
Figura 5.16 - Circuitos de segunda, terça e quarta-feira em Silves otimizados pelo cenário 2	62
Figura 5.17 - Circuitos de quinta, sexta e sábado em Silves otimizados pelo cenário 2	63
Figura 5.18 - Média no nº de contentores recolhidos por hora, para cada rota	65
Figura 5.19 - Circuitos de segunda e terça de Armação otimizados pelo cenário 3	67
Figura 5.20 - Circuitos de segunda, terça e quarta de Silves otimizados pelo cenário 3	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Registo dos nós processados para o exemplo anterior (Karadimas et al., 2007).....	17
Tabela 4.1 - Contentores e capacidade disponível de cada rota	37
Tabela 4.2 - Quantidades mensais recolhidas indiferenciadamente, nos 9 primeiros meses de 2018.....	38
Tabela 5.1 - Resultados obtidos no cenário 1 para Algoz/Tunes, Messines e S. Marcos50	
Tabela 5.2 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Algoz/Tunes.....	55
Tabela 5.3 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Messines.....	57
Tabela 5.4 - Comparação dos cenários 1 e 2 para S. Marcos	58
Tabela 5.5 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Armação	61
Tabela 5.6 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Silves.....	64
Tabela 5.7 - Taxas de enchimento estimadas com aumento de 10% face ao cenário 2	66
Tabela 5.8 – Quantidades de resíduos estimadas com aumento de 10% face ao cenário 2, a negrito as quantidades que precisam de ser recolhidas em duas voltas.....	66
Tabela 5.9 - Comparação dos circuitos de segunda e terça-feira de Armação nos cenários 2 e 3	68
Tabela 5.10 - Comparação dos circuitos de segunda, terça e quarta de Silves nos cenários 2 e 3	70

LISTA DE SIGLAS

AS – Aterro Sanitário

CARP – *Capacitated Arc Routing Problem*

CMS – Câmara Municipal de Silves

CPP – *Chinese Postman Problem*

FFMS – Fundação Francisco Manuel dos Santos

GRTIP – Geração de uma Rota por Inserção da Tarefa Mais Próxima

GVNT – *Guide Variable Neighborhood Thresholding*

MDVRP – *Multi-Depot Vehicle Routing Problem*

MTSP – *Multiple Traveling Salesman Problem*

NA – *Network Analyst*

PCV – Problema do Caixeiro Viajante

PVRP – *Period Vehicle Routing Problem*

RPP – *Rural Postman Problem*

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TSP – *Traveling Salesman Problem*

VRP – *Vehicle Routing Problem*

VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O rápido crescimento populacional e económico, assim como o aumento dos padrões de vida da sociedade têm acelerado a taxa de produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), tornando assim a sua gestão um dos maiores desafios em todo o mundo (Seo *et al.*, 2004).

A gestão destes resíduos, quer pela quantidade quer pelas suas características diversificadas, representa atualmente um problema a que é preciso dar resposta, de forma sustentável e ambientalmente adequada (Piedade & Aguiar, 2010).

Além da preocupação ambiental, na gestão de RSU, os custos inerentes à recolha e ao transporte de resíduos têm um peso de 40% a 70% relativamente ao custo total do sistema (Martinho e Gonçalves, 2000).

Os sistemas de recolha de resíduos urbanos nem sempre estão adequadamente programados, visto que lidar com a problemática dos resíduos se torna complexo devido à existência de muitas variáveis a ter em conta. Um sistema que esteja bem dimensionado numa determinada altura, se futuramente for avaliado pode já não estar e ter de ser reajustado.

Foi com o intuito de melhorar o sistema de recolha de resíduos urbanos que surgiu a proposta da Câmara Municipal de Silves (CMS), realizar um trabalho que estudasse o problema da otimização dos circuitos no concelho.

Um das preocupações que a CMS demonstrou relativamente a esta problemática, foi o facto de o concelho ser afetado por um aumento de população no Verão devido ao turismo, que se faz sentir um pouco por toda a região do Algarve. O litoral do concelho, especialmente, sofre um aumento de produção de resíduos nessa altura do ano.

Assim sendo, o objetivo da dissertação é otimizar os vários circuitos de recolha de resíduos urbanos indiferenciados no concelho de Silves tendo em conta as variáveis que possam afetar a qualidade do serviço de recolha. Este estudo procura melhorar os circuitos de recolha de resíduos que se encontram implantados atualmente.

A modelação dos circuitos será feita recorrendo à aplicação *Network Analyst*, uma extensão do programa *ArcGIS*, que tem como finalidade resolver problemas de percursos de veículos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS

Toda a atividade, quer seja antrópica ou natural, gera resíduos que se acumulam no ambiente. Este consegue reintegrar esses resíduos nos ciclos biogeoquímicos, embora apenas em determinada medida. Porém, com base nos princípios da termodinâmica, nenhuma ação é 100% eficiente, quer no que diz respeito ao uso dos materiais quer no que respeita a energia envolvida. Logo, tudo e todos contribuímos para a poluição, cujas consequências, depois, inevitavelmente nos atingem (Oliveira et al., 2009).

No passado, os resíduos domésticos praticamente não constituíam um problema. A maioria dos materiais utilizados continha componentes de origem animal ou vegetal, uma vez que regressassem à terra decompunham-se naturalmente nos seus compostos elementares, integrando um novo ciclo de vida. Porém, o surgimento de novos materiais resultantes da evolução tecnológica e científica fez com que o panorama se alterasse (Levy & Cabeças, 2006).

O rápido crescimento populacional, o crescimento económico e o aumento dos padrões de vida da sociedade têm acelerado a taxa de produção de RSU, tornando assim a sua gestão um dos maiores desafios em todo o mundo (Seo *et al.*, 2004).

Sendo a composição e produção de resíduos função do tipo de sociedade, estes fatores têm passado por importantes variações ao longo dos anos, acompanhando o desenvolvimento económico. Atualmente é notório um aumento na percentagem de embalagens e de material plástico na composição física dos RSU, também ao nível da produção per capita se tem vindo a registar um crescimento contínuo ao longo dos últimos 100 anos (Levy & Cabeças, 2006).

A gestão destes resíduos, quer pela quantidade quer pelas suas características diversificadas, representa um problema a que é preciso dar resposta, de forma sustentável e ambientalmente adequada (Piedade & Aguiar, 2010).

2.2 GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS

Atualmente, a gestão de resíduos além da preocupação com a segurança e saúde, valoriza a conservação dos recursos, os riscos ambientais, alerta para a necessidade de mudar comportamentos e coresponsabilizar todos os agentes envolvidos (Martinho & Gonçalves, 2000).

Para Levy & Cabeças (2006), os objetivos gerais de um Sistema Integrado de Resíduos Sólidos são:

- Fazer adequadamente a recolha, transporte, tratamento, valorização e deposição final dos resíduos produzidos, de modo a garantir a qualidade ambiental e de vida das populações;
- Garantir que o sistema acompanha e responde ao desenvolvimento económico e social da região onde se insere;
- Valorizar os recursos disponíveis;
- Desenvolver um quadro da maior e melhor eficiência do serviço prestado;
- Integrar soluções num quadro de ações que permita concretizar as prioridades estabelecidas.

Os objetivos sectoriais são baseados nas operações e tecnologias que integram os modelos concebidos e implantados para o seu funcionamento, bem como as atividades complementares:

- Deposição (porta-a-porta e/ou de proximidade);
- Recolha (indiferenciada e/ou seletiva);
- Transporte (direto e/ou com transferência);
- Sistema de tratamento e valorização dos resíduos;
- Destino final;
- Modelo de gestão (institucional ou privado);
- Sistema financeiro (autossustentável, poluidor/pagador).

A conceção, desenvolvimento e exploração de qualquer sistema de gestão de resíduos, pressupõe o conhecimento sistemático e aprofundado das suas características, quer quantitativas, quer qualitativas (Levy & Cabeças, 2006).

2.3 OTIMIZAÇÃO DE CIRCUITOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS

O conceito de otimização de circuitos está associado não só à implementação de novos circuitos, mas também ao ajuste de circuitos já existentes. Periodicamente, os circuitos já implantados devem ser reajustados, caso seja necessário, no sentido de se minimizarem os trajetos e os tempos de transporte.

Além da minimização de trajetos e tempos de transporte, que reduzem os custos associados, circuitos otimizados significam também uma redução de impactos ambientais, pela diminuição de emissões para a atmosfera associada ao menor consumo de combustível (Martinho & Gonçalves, 2000).

Na otimização de um sistema de recolha, pretende-se minimizar o número de circuitos e evitar que os veículos visitem a mesma rua mais do que uma vez, quando não é necessário (Carvalho, 2008). Consideram-se circuitos de recolha bem equilibrados os que conseguem que a equipa de recolha cumpra o circuito no tempo estipulado. O processo de determinar circuitos de recolha bem equilibrados é por vezes designado por análise macro-circuito (Rhyner et al., 1995).

Uma importante técnica heurística para a análise macro-circuito consiste em dividir a área de ação em zonas, cujos critérios de delimitação podem ser as barreiras físicas ou administrativas (por exemplo rios, linhas de comboio, autoestradas, grandes parques urbanos). Após identificadas as zonas, estas podem ser divididas em circuitos individuais (Rhyner et al., 1995).

Alguns princípios que podem ser aplicados à análise macro e microcircuito foram identificados por Schur e Shuster (1974) *in* Martinho e Gonçalves (2000). Entre esses princípios, destacam-se os seguintes:

- Os circuitos não devem ser fragmentados ou sobrepostos. Cada circuito deve ser compacto, consistindo em segmentos de ruas agrupadas na mesma área geográfica;
- A recolha efetiva mais a distância de transporte, devem ser razoavelmente constantes para cada circuito (tempos de trabalho equilibrados);
- O circuito deve iniciar-se tão próximo quanto possível da garagem tendo em atenção os percursos de grande trânsito e as ruas de um só sentido;
- As ruas de maior tráfego não devem ser recolhidas nas horas de ponta;
- No caso de ruas de um só sentido é preferível iniciar o circuito perto do final da rua com maior elevação, de forma a percorrer a zona em sentido descendente.

Contudo, para Rhyner et al. (1995), os sistemas de recolha de resíduos envolvem problemas mais complexos que não podem ser modelados como simples problemas clássicos. Por exemplo, a necessidade de veículos de diferentes tipos ou o facto de alguns pontos de recolha requerem veículos específicos, a existência de várias garagens ou de diversos locais de descarga de viaturas, algumas ruas só possuem um sentido ou não permitem inversão de marcha e certas áreas requerem horários de recolha específicos.

2.4 ANÁLISE DE REDES

As soluções de problemas de transporte, particularmente problemas de circuitos de veículos, baseiam-se na Análise de Redes, uma disciplina da Investigação Operacional.

A Investigação Operacional é um ramo interdisciplinar da matemática aplicada que faz uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos na ajuda à tomada de decisões. É usada, sobretudo para analisar sistemas complexos do mundo real, tipicamente com o objetivo de melhorar ou aperfeiçoar o desempenho. Com a evolução observada na informática criaram-se condições de concretização algorítmica e velocidade de processamento adaptados à imaginação dos profissionais da investigação operacional, e a microinformática permitiu relacionar diretamente os sistemas de informação com as decisões (Barba, 2013).

É necessário o uso da análise de redes para determinar trajetos de menor custo sobre um conjunto de arcos e nós, tendo em consideração determinadas limitações.

Uma rede é um conjunto de pontos, designados por nós (vértices ou junções) e um conjunto de curvas, chamados arcos (ramos ou ligações). Os arcos ligam um certo número de pares de nós (Bronson & Naadimuthu, 2001).

Uma rede é interpretada como um grafo e representa a interação ou o movimento entre determinadas localizações definidas por pontos. A Figura 1 apresenta uma rede constituída por cinco nós, designados de A a E, e seis arcos definidos pelas curvas AB, AC, AD, BC, CD, DE.

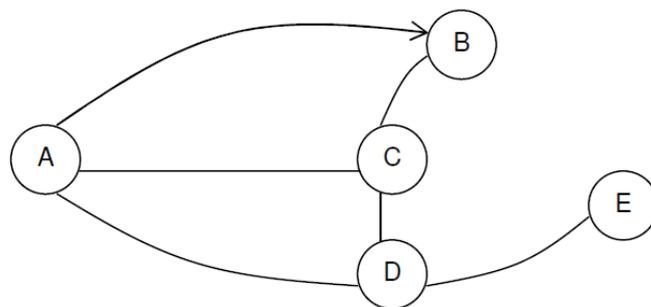


Figura 2.1 - Grafo representando uma rede (Bronson & Naadimuthu, 2001).

Um ramo é orientado se lhe estiver associado um sentido. Esquemáticamente, os sentidos são apresentados por setas. A seta no ramo AB significa que este ramo é dirigido de A para B. Qualquer movimento ao longo deste ramo deve ter a sua origem em A e terminar em B, ou seja, o movimento de B para A não é permitido.

Dois ramos são conexos se possuírem um nó comum. Na Figura 1, os ramos AB e AC são conexos, mas os ramos AB e CD são não conexos. Um percurso é uma sequência de ramos conexos, tal que nenhum nó é repetido nessa alternância de nós e ramos. Uma rede é conexa se para todo o par de nós da rede existir, pelo menos, um percurso interligando o par. Se o percurso é único para cada par de nós, a rede conexa é chamada árvore. Equivalentemente, uma árvore é uma rede conexa que tem um nó a mais que os ramos (Bronson & Naadimuthu, 2001).

As sete pontes de *Königsberg* é um dos problemas mais antigos e mais famosos da análise de redes e teoria de grafos. Este problema baseou-se na cidade de *Königsberg*

(atualmente Kaliningrado, Rússia), dividida pelo rio *Pregol* onde há duas grandes ilhas que, juntas, formam um complexo que na época tinha sete pontes. Discutia-se a possibilidade de atravessar todas as pontes, sem repetir nenhuma. Em 1736, Leonhard Euler resolveu o problema, provando que não existia caminho que cumprisse o requisito de cada ponte ser atravessada uma única vez (Gribkovskaia et al., 2007).

Euler transformou os caminhos em retas e suas intersecções em pontos criando possivelmente o primeiro grafo da história. Desta forma, percebeu que só seria possível atravessar o caminho inteiro passando uma única vez em cada ponte se houvesse no máximo dois pontos de onde saísse um número ímpar de caminhos. Isto acontece porque em cada ponto deve haver um número par de caminhos, pois será preciso um caminho para "entrar" e outro para "sair". Os dois pontos com caminhos ímpares referem-se ao início e ao final do percurso, pois estes não precisam de um para entrar e um para sair, respetivamente (Mourão, 1999).

2.5 PROBLEMAS CLÁSSICOS DE PERCURSOS

Os problemas de percursos de veículos são dos mais estudados no campo da otimização combinatória. Existem diversos casos reais que podem ser modelados como problemas de otimização de percursos de veículos, como por exemplo, distribuição de mercadorias ou serviço a clientes, recolha de resíduos, distribuição de combustível, entrega expresso de encomendas, distribuição de correio, entre outros (Matos, 2005).

De acordo com Bodin et al. (1983) *in* Silva (2009), os problemas clássicos de percursos de veículos são os que se seguem.

2.5.1 PROBLEMA DO CAIXEIRO-VIAJANTE

O problema do caixeiro-viajante (*Traveling Salesman Problem* - TSP) é um problema de otimização que consiste em determinar um único percurso com o menor custo possível que permita ao veículo percorrer todos os nós (clientes) de uma rede, uma única vez. O TSP é baseado num único depósito e o veículo sai e retorna à mesma

base. Este problema não tem restrições de capacidade de veículos e as afetações (recolhas ou entregas) são previamente conhecidas (Silva, 2009).

O TSP pode ser simplesmente explicado como um problema em que se pretende encontrar o percurso que um caixeiro-viajante deve fazer, para visitar exatamente uma vez cada uma das cidades (nós) e retornar ao ponto inicial do percurso, minimizando o custo (distância ou tempo) total do percurso (Dantzig et al., 1954).

O TSP é um dos problemas de otimização mais investigados por cientistas, matemáticos e investigadores de diversas áreas.

2.5.2 PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS-VIAJANTES

O problema de múltiplos caixeiros-viajantes (em inglês *Multiple Traveling Salesman Problem* - MTSP) é uma extensão do problema do caixeiro-viajante, contudo em vez de único percurso, determinam-se vários percursos. Este tipo de problema procura determinar múltiplos percursos com o menor custo possível, um para cada veículo, de forma que cada caixeiro-viajante percorra pelo menos um nó da rede, e cada nó seja visitado uma única vez. O problema baseia-se num único depósito e o veículo sai e retorna à mesma base. Este problema não tem restrições de capacidade de veículos e as afetações (recolhas ou entregas) são determinísticas (Silva, 2009).

2.5.3 PROBLEMA DE ROTAS DE VEÍCULOS

O problema de rotas de veículos (*Vehicle Routing Problem* - VRP) é uma extensão do problema MTSP, onde se acrescenta a restrição da capacidade. O VRP tem como objetivo encontrar um conjunto de percursos com o menor custo, com origem e destino num depósito, de forma a que todos os nós (recolhas ou entregas), previamente conhecidas, sejam visitados uma apenas uma vez (Silva, 2009).

Uma das restrições deste tipo de problema relaciona-se com a capacidade do veículo, tal como volume ou peso máximo. Por vezes, surgem também limites associados ao tempo de viagem, ou intervalos de tempo para satisfação dos clientes (Sahoo et al., 2005).

Para Silva (2009), a complexidade dos problemas fez com que surgissem algumas variantes do problema VRP tradicional, que adicionam restrições ou níveis de decisão ao problema tradicional, sendo que as mais comuns são:

- Problema de Rotas de Veículos Periódico - num VRP que se pretende determinar uma sequência de rotas para vários dias de um certo horizonte temporal, obtém-se uma extensão deste, chamada *Period Vehicle Routing Problem* (PVRP). Neste problema é adicionado um nível de decisão referente à periodicidade, a recolha de resíduos, efetuada sempre com a mesma periodicidade, por exemplo semanalmente, enquadra-se neste tipo de problema (Baptista et al., 2002).
- Problema de Rotas de Veículos com Janelas Temporais – este problema de rotas de veículos com janelas temporais (*Vehicle Routing Problem with Time Windows* - VRPTW) é uma variante do VRP com restrições de tempo. As janelas temporais aumentam a complexidade do problema, constituindo horários de atendimento (de entrega ou recolha) que os clientes impõem.
- Problema de Rotas de Veículos com Múltiplos Depósitos – este problema é uma variante do VRP que utiliza múltiplos depósitos (Multi-Depot Vehicle Routing Problem – MDVRP), sendo necessário decidir a distribuição pelos diferentes depósitos existentes.

2.5.4 PROBLEMA DO CARTEIRO CHINÊS

O problema do carteiro chinês (*Chinese Postman Problem* - CPP) é uma variação do problema do caixeiro-viajante, sendo que os clientes em vez de estarem localizados em nós, estão localizados em arcos. O CPP tem como objetivo determinar um único percurso com o menor custo possível que permita ao veículo percorrer todos os arcos (clientes) de uma rede, uma única vez. O problema é baseado num único depósito e o veículo deve sair e retornar à mesma base. Também este problema não tem restrições de capacidade de veículos e as afetações (recolhas ou entregas) são determinísticas (Silva, 2009).

Como caso particular do CPP, existe o problema do carteiro rural (*Rural Postman Problem* - RPP), neste é necessário percorrer somente um conjunto de arcos de uma

rede. Segundo Eiselt et al. (1995), são raros os casos práticos onde é necessário percorrer a totalidade dos arcos numa rede, por isso a maioria dos casos reais são geralmente modelados como RPP.

Uma variante do CPP é o problema de percursos de veículos com afetações em arcos (*Capacitated Arc Routing Problem* - CARP). O CARP foi introduzido por Golden e Wong (1981) e difere do CPP ao incluir restrição de capacidade dos veículos. Esta restrição de capacidade referida, não corresponde necessariamente à capacidade do veículo em termos de carga, podendo também corresponder a um tempo máximo de trabalho ou a uma distância máxima a percorrer.

2.5.5 SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS DE PERCURSOS DE VEÍCULOS

De acordo com Silva (2009), as soluções para os vários problemas de otimização de percursos agrupam-se em três grandes grupos: os métodos exatos, os métodos heurísticos e os métodos meta heurísticos.

O primeiro grupo, os métodos exatos, procura encontrar a solução ótima e a sua aplicação é em problemas de menor complexidade. Mesmo os métodos exatos mais avançados têm limitações e devido à elevada complexidade dos problemas atuais nem sempre é possível aplicar esses algoritmos (Rizzoli et al., 2007 in Carvalho, 2008). O algoritmo de Dijkstra, o algoritmo de Floyd e o método Húngaro são exemplos de métodos exatos existentes (Oliveira, 2008).

Devido à limitação dos algoritmos exatos na resolução de problemas mais complexos, têm sido estudados na literatura métodos heurísticos. Estes definem-se como procedimento de aproximação das soluções de um problema e apesar de não garantirem a solução ótima, procuram soluções sub-ótimas de elevada qualidade e são aplicados a problemas de maiores dimensões (Silva, 2009).

Segundo Oliveira (2008) os métodos heurísticos dividem-se em duas grandes classes: os métodos de construção e os métodos de melhoria de rotas. São exemplos de algoritmos heurísticos o método de Clarke e Wright, o método de inserção e o método obtenção de sementes.

O terceiro grupo, os métodos meta-heurísticos, caracteriza-se por utilizarem dois ou mais procedimentos, de forma a melhor a solução que apresenta. Também podem ser designados de métodos emergentes e alguns autores englobam estes no mesmo grupo dos heurísticos (Cunha, 1997 *in* Silva, 2009). A pesquisa tabu e os algoritmos genéticos são dois exemplos de métodos meta heurísticos (Oliveira, 2008).

Devido à complexidade do tema da otimização, existem mais métodos para cada um dos grupos apresentados, sendo que os anteriormente referidos foram os abordados nos estudos de Carvalho (2008), Oliveira (2008) e Silva (2009).

2.6 TRABALHOS DE OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS DE RECOLHA DE RESÍDUOS

Ao longo do tempo, com o aumento da preocupação em relação aos problemas ambientais, os sistemas de recolha de resíduos têm ganho relevância e têm sido alvo de estudo por diversos autores.

Beltrami e Bodin (1974) realizaram o primeiro trabalho nesta área, onde abordaram o problema da recolha de resíduos indiferenciados e da limpeza de ruas em Nova Iorque. Os autores depararam-se com um problema do tipo PVRP e para sua resolução usaram uma adaptação da heurística de Clarke e Wright. Uma das dificuldades reveladas foi o facto de existirem necessidades de visita diferentes entre os pontos de recolha, existindo locais que precisam de ser recolhidos diariamente e outros três vezes por semana, por exemplo. Foram usadas duas abordagens diferentes: na primeira desenharam-se as rotas e posteriormente associaram-se estas aos dias da semana, já na segunda, decidiram-se inicialmente quais os pontos a visitar em cada dia e então construíam-se as rotas com base nesses pontos. Face a um caso onde diariamente cerca de 25000 toneladas de resíduos tinham de ser recolhidas e 11000 milhas de ruas necessitavam ser limpas, os autores revelam que o estudo em questão conduziu a reduções de custo evidentes.

Kulcar (1996) fez um estudo sobre a otimização da recolha de resíduos na cidade de Bruxelas, na Bélgica. Foi desenvolvida uma metodologia que visa demonstrar a

minimização dos custos associados à recolha numa área urbana. No trabalho de Kulcar, além de abordados diferentes tipos de transporte, é também discutida a instalação de estações de transferência. Kulcar fez análises de sensibilidade aos resultados obtidos, onde conclui que o caso mais interessante acontece quando não se utilizam estações de transferência e também que nenhum dos dois locais para instalar as estações demonstra ser vantajoso em relação ao outro. Em relação aos outros tipos de transporte, ferroviário e marítimo, não demonstram ser viáveis economicamente em relação ao sistema implementado, onde o transporte é feito por camiões, devido aos custos fixos associados à construção de novas infraestruturas. Mesmo no cenário sem estações de transferência, a otimização feita demonstra reduzir os custos associados comparativamente ao sistema inicial.

Chang et al. (1997) fizeram um estudo que combinava modelos analíticos com um programa de SIG para analisar estratégias alternativas à recolha de resíduos numa área metropolitana de Taiwan. O estudo teve como base três cenários: o primeiro como situação inicial e os outros dois como proposta de otimização. Verificou-se que os dois cenários propostos demonstram ser mais eficientes do que o cenário inicial, distribuindo equilibradamente as distâncias entre os vários circuitos, o que não acontecia, e diminuindo as distâncias percorridas na maioria dos circuitos.

Teixeira et al. (2004) apresentaram um método de planeamento de rotas de recolha de diferentes tipos de resíduos, destinados a reciclagem, na zona centro de Portugal. Na resolução, os autores recorreram a previsões de enchimento diário, baseadas em registos históricos. Foi usado um conjunto de métodos heurísticos que permitiram obter uma redução média de 29% nas distâncias percorridas, salientando que as reduções maiores ocorreram nos tipos de resíduos que são recolhidos com maior frequência e que o sistema implantado é menos eficiente do que o cenário determinado pelo modelo devido à dificuldade de planear as múltiplas recolhas, por desconhecimento das taxas de enchimento por exemplo.

Sahoo et al. (2005) fizeram um trabalho para a Waste Management, uma empresa privada norte-americana de gestão de resíduos, no qual estudaram métodos de otimização de recolha de resíduos nos Estados Unidos da América. Neste estudo foi

usado o programa *WasteRoute* e a solução do problema foi baseada em duas fases. A primeira fase consistia num algoritmo construtivo para estimar o número de rotas para um determinado local, tendo em conta diversas variáveis, enquanto a segunda fase, destinava-se a otimizar as rotas criadas, aplicando algoritmos meta heurísticos. Um exemplo de aplicação do modelo estudado aconteceu na cidade de Elgin no estado do Illinois, onde de 10 rotas inicialmente estabelecidas se conseguiu reduzir para 9 e onde a quantidade recolhida por hora passou de cerca de 43 m³ para 48 m³.

Nuortio et al. (2006) dedicou-se à otimização de rotas na recolha municipal de resíduos em duas regiões diferentes na Finlândia, propondo uma metodologia meta-heurística, denominada *Guided Variable Neighborhood Thresholding (GVNT)*, para resolução do problema. O modelo desenvolvido determina as rotas de recolha com base em previsões, baseadas no registo histórico das quantidades depositadas em cada contentor. Os resultados foram apresentados consoante dois cenários: otimização somente das rotas e otimização de rotas mais agendamento de recolhas, para um período de 4 semanas. Quanto à otimização isolada de rotas foi obtida uma melhoria média de cerca de 12% na distância percorrida enquanto na otimização de rotas com agendamento de rotas o valor médio de melhoria foi cerca de 46%. Esta melhoria deve-se ao reagendamento de recolhas caso seja necessário, ao contrário do sistema inicial que se limita a cumprir a agenda ou horários, sem ajustes.

Silva (2009) na sua tese de mestrado estudou a otimização de circuitos de recolha de resíduos urbanos na Região Autónoma da Madeira, Portugal. O trabalho foi desenvolvido no *NetworkAnalyst*, extensão associada ao programa *ArcGIS*. A autora focou-se em três cenários: o cenário A representa a situação inicial e os cenários B e C determinados pelo programa. É de salientar que o sistema de recolha inicial (cenário A) é feito municipalmente e que a solução apresentada nos cenários B e C passa por uma recolha integrada, eliminando fronteiras de diferentes municípios. Os modelos B e C demonstraram serem necessários menos circuitos de recolha face ao cenário inicial, passando de 105 para 86 circuitos, visto que inicialmente existiam circuitos com 4 horas, que nos modelos B e C foram dimensionados para 7 horas. A autora refere que no cenário A se percorrem menores distâncias na recolha de resíduos comparativamente aos cenários B e C mas que cenário B, apesar de se percorrerem mais quilómetros, a

necessidade de recursos humanos é menor, concluindo que é mais vantajoso economicamente percorrer mais 3 mil quilómetros anualmente com recurso a menos pessoal.

Beijoco (2011), também na sua tese de mestrado, trabalhou na otimização do sistema de recolha e transporte de resíduos de vidro na zona do Barreiro e simultaneamente estudou as emissões poluentes e do consumo de combustível associados ao sistema de recolha utilizado pela Amarsul, empresa a operar na área de estudo. O sistema implementado é composto por 5 circuitos, com um total de 230 ecopontos para depósito de vidro. A autora utilizou várias ferramentas informáticas, sendo que na otimização foi utilizada a extensão *NetworkAnalyst*, do programa *ArcGIS*, e no cálculo de emissões e consumo de combustível a integração entre os programas *ArcGIS* e *Visual Basic for Applications*. Os resultados de otimização apresentaram-se por distância e por tempo, concluindo a autora que a otimização por tempo demonstrou ser melhor do que a otimização por distância. Em relação à situação inicial, a aplicação do sistema otimizado por tempo, permitiria uma diminuição média de cerca de 57% dos custos de recolha e transporte, o que se traduziria numa poupança de cerca de 11000€ por ano. Relativamente às emissões poluentes, as potenciais reduções situaram-se entre os 40% e 50%, enquanto os tempos de viagem e total poderiam ser reduzidos em cerca de 60%.

Afonso (2012) realizou um trabalho que se destinava a determinar novas rotas e a otimizar as rotas existentes, na recolha porta a porta de resíduos urbanos no Seixal. O problema abordado neste trabalho é do tipo CARP, um problema com procura nos arcos com restrições de capacidade. Para resolução do problema, a autora desenvolveu uma heurística construtiva, denominada GRTIP (Geração de uma Rota por Inserção da Tarefa mais Próxima), implementada recorrendo à linguagem de programação *Visual Basic for Applications*, uma ferramenta do *Excel*. Com a metodologia utilizada foram determinadas novas rotas para os 21 circuitos existentes no concelho e comparando os resultados obtidos com a situação inicial, verificou-se que em todos os circuitos diminuiu o tempo necessário para efetuar a recolha e em 20 deles diminuiu também a distância percorrida. Uma limitação encontrada pela autora foi a obtenção dos comprimentos dos arcos, visto que os dados tiveram de ser transcritos manualmente para os mapas em SIG.

Uma das limitações do processo de otimização que demonstra ser transversal a parte dos trabalhos revistos é a interferência de um grande número de variáveis passíveis de influenciar a eficiência do sistema de recolha. Por exemplo, uma das variáveis abordadas é a taxa de enchimento dos contentores, que pode depender de dia para dia ou consoante a altura do ano, o que significa que a eficiência de um sistema otimizado depende deste e de outros fatores.

Em suma, existem muitos trabalhos enquadrados nesta área da otimização de rotas de recolha de resíduos, desde artigos publicados a teses de mestrado e doutoramento, sendo que os que foram previamente apresentados são apenas uma pequena parte do que já foi feito.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados de otimização apresentados posteriormente.

Dos vários métodos enunciados no capítulo anterior, para resolução do tipo de problema em estudo, este trabalho baseou-se na aplicação de um algoritmo exato e de um algoritmo meta heurístico.

3.1 ALGORITMO DE *DIJKSTRA*

O algoritmo exato utilizado foi o algoritmo de *Dijkstra*, que é o mais famoso e mais simples dos algoritmos usados no cálculo de custo mínimo entre os vértices de uma rede, escolhendo um dado vértice como origem, o algoritmo encontra o caminho mínimo desse dado vértice para todos os restantes (Karadimas et al., 2007).

Este algoritmo reduz o tempo de processamento e os requisitos necessários a nível computacional para calcular o caminho ótimo. É estabelecido um equilíbrio, relativamente ao que é computacionalmente possível, para o cálculo de um trajeto que é muito próximo ao ideal, que é feito dividindo a rede em nós (onde as linhas se ligam), sendo o trajeto entre esses nós representado pelas linhas. Cada uma dessas linhas tem um custo associado, indicando o respetivo comprimento até alcançar um nó (Karadimas et al., 2007).

O algoritmo parte duma estimativa inicial para o caminho mínimo e vai sucessivamente ajustando essa estimativa. Em cada iteração um determinado nó é comparado com os restantes em termos de custo, até que seja obtido o caminho de menor custo para chegar do nó de origem até ele, passando de seguida ao próximo (Sanches & Silva, 2009).

A figura seguinte demonstra um exemplo de aplicação do algoritmo de *Dijkstra*.

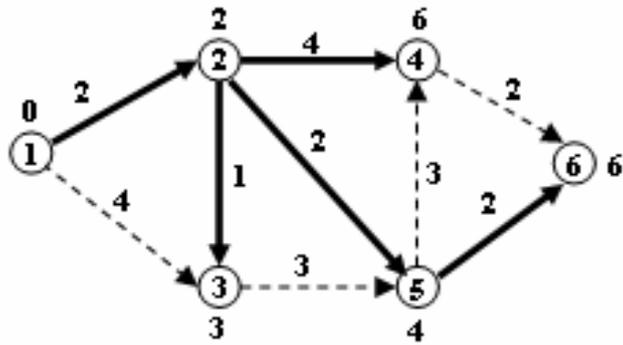


Figura 3.1 - Exemplo de aplicação do algoritmo de Dijkstra (Karadimas et al.,2007)

O exemplo apresentado consiste em seis nós interligados por linhas direcionais, cada uma com um custo associado.

O nó nº1 é definido como origem, de seguida o caminho mais curto entre este e os outros nós é encontrado a partir dos antecessores (setas a negrito) e anotado esse custo junto a cada nó. Todos os nós são processados uma única vez, sendo que o nó de origem, neste caso o 1, é processado em primeiro lugar (Karadimas et al, 2007).

Basicamente, uma vez visitado um nó, a seleção do nó seguinte será feita através duma sequência de iterações comparativas, em que se compara os custos para cada nó passível de ser visitado, sendo que o que representar o caminho mais curto e menores custos associados, será o próximo a ser processado.

É possível gerar uma tabela que regista os nós processados e as respetivas distâncias, conforme se mostra de seguida.

Tabela 3.1 - Registo dos nós processados para o exemplo anterior (Karadimas et al., 2007)

Queue	Next node	Distance						Predecessors						
		1	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6		
1	2	-	2	4	∞	∞	∞							
1,2	3	-	-	3	6	4	∞		2	2	2			
1,2,3	5	-	-	-	6	4	∞							
1,2,3,5	4	-	-	-	6	-	6							5
1,2,3,5,4	6	-	-	-	-	-	6							
1,2,3,5,4,6	-	-	-	-	-	-	-							

3.2 PESQUISA TABU

O segundo método utilizado pertence ao grupo dos meta heurísticos e denomina-se *Pesquisa Tabu*.

A Pesquisa Tabu é um método de otimização matemática, da classe dos métodos de pesquisa local, no qual a partir de uma solução possível, se tenta encontrar uma solução melhor que a anterior, até que se satisfaça um dado critério (Silva, 2009).

Este algoritmo, através do uso da memória, utiliza o conceito de lista tabu, onde são armazenadas todas as soluções estudadas (Campos, 2014). O uso flexível da memória permite efetuar repetidos movimentos de uma solução para outra solução vizinha, determinando alternativas que são classificadas como proibidas ou como atrativas (Oliveira, 2008).

A lista tabu associa a todos os movimentos feitos um certo atributo (tabu), para um determinado número de iterações (tempo tabu). Esses movimentos são proibidos a não ser que a solução obtida satisfaça o critério pretendido, em regra geral, a solução seguinte ser melhor que a encontrada até então. Os atributos são selecionados de forma a evitar o regresso a soluções já visitadas recentemente e também para evitar que o algoritmo entre em ciclo (Oliveira, 2008).

Basicamente, uma lista tabu contém os n últimos elementos visitados, enquanto outras estruturas de lista tabu proíbem as soluções que têm determinados atributos. Por exemplo, no PCV, soluções que incluem determinados arcos ou impedem determinados movimentos (Oliveira, 2008).

3.3 NETWORK ANALYST

Os métodos anteriormente descritos foram aplicados no programa que serviu de base à otimização dos circuitos, o *Network Analyst*, extensão do *ArcGIS*.

O *Network Analyst* foi desenvolvido para criar, gerir e analisar redes de transportes. Esta extensão permite delinear percursos otimizados com base no tempo ou distância percorrida, indicar direções de percursos, fazer um levantamento de infraestruturas e

serviços mais próximos e definir áreas de serviço. Além disso, permite ainda calcular matrizes de custo de origem-destino para várias localizações numa rede, bem como atribuir percursos e paragens a frotas de veículos (Silva, 2009).

Das várias funcionalidades presentes no *Network Analyst*, destacam-se a funcionalidade *Route* e a *Vehicle Routing Problem (VRP)*, tendo em conta o tipo de problema em estudo.

A *Route* é utilizada para determinar o melhor percurso entre dois ou mais pontos, percurso esse que depende da impedância/característica que se pretende otimizar, trajeto mais rápido ou trajeto mais curto. Esta função tem como limitação permitir obter uma solução apenas com base unicamente num dos atributos, tempo ou distância (Campos, 2014).

Por sua vez, a função *Vehicle Routing Problem (VRP)* permite encontrar os melhores percursos para um conjunto de veículos que se destinam a visitar um conjunto elevado de pontos, acrescentando uma série de restrições (Esri, 2013, *in* Campos, 2014). A solução *VRP* consegue responder a problemas mais específicos relativamente à função *Route*, tais como, quantidades a recolher por cada ponto visitado, pausas de trabalho e custos de operação. Estas restrições permitem a representação mais rigorosa do problema, acrescentando a capacidade da viatura, tempo de trabalho a respeitar, velocidades, entre outros elementos (Esri, 2013, *in* Campos, 2014).

No geral, o *Network Analyst* utiliza os dois algoritmos descritos previamente: o algoritmo de *Dijkstra* (método exato) e a *Pesquisa Tabu* (método meta heurístico). Para solucionar problemas modelados nas funções *Route* e *VRP*, em primeiro lugar o *Network Analyst* gera uma matriz de custos entre os vários pontos a percorrer, com base no algoritmo de *Dijkstra*. Posteriormente, utiliza essa matriz e recorre à *Pesquisa Tabu* para construir uma primeira solução do problema, que vai sendo otimizada ao longo do tempo, de forma a encontrar a melhor sequência de visita englobando todos os pontos (Esri, 2013 *in* Campos, 2014).

3.4 REDE VIÁRIA

A rede viária é um elemento essencial no tema da análise de redes, por isso é necessário caracterizá-la da melhor forma com base num conjunto de atributos, de forma a ir de encontro à situação encontrada no trabalho.

A rede viária da área em estudo foi facilmente obtida de um servidor online (BBBike.org, 2020), que utiliza a tecnologia do *OpenStreetMap*, que é um projeto que tem como objetivo criar e disponibilizar dados geográficos gratuitos a nível mundial, funcionando de forma colaborativa.

Obteve-se um ficheiro compatível com *ArcGIS*, com a rede viária a nível regional, da qual se extraiu apenas a área de estudo, o concelho de Silves e as vias envolventes. Também foi necessário extrair apenas as vias que permitissem circulação rodoviária, pois a rede viária era composta também por caminhos pedonais, caminhos de ferro, linhas de água, entre outros elementos.

3.4.1 ATRIBUTOS DA REDE VIÁRIA

Ao analisar os atributos da rede viária obtida, rapidamente se percebeu que esta não estava completa, tendo velocidades de circulação atribuídas só em parte da rede assim como sentidos de circulação não definidos em alguns locais, por exemplo.

Esses atributos permitem identificar os segmentos de via e caracterizar a forma como lá se circula. Foi necessário fazer uma análise aos diversos atributos da rede de forma a perceber onde se encontravam as falhas a corrigir, para que a rede funcionasse corretamente e retratasse a realidade.

Alguns atributos da rede são importantes para o *Network Analyst*, de forma a que este funcione da forma desejada, então tiveram de ser adicionados à *feature class* da rede viária alguns campos, outros foram simplesmente verificados e corrigidos se necessário. São enumerados de seguida os campos adicionados à tabela de atributos:

- “Oneway” – o campo oneway, originalmente presente no ficheiro obtido, teve de ser atualizado pois muitos troços de sentido único não se apresentavam como tal, além disso, os que tinham informação de sentido único não

indicavam em que sentido se transitava. Analisou-se a totalidade do concelho, de forma a colmatar as lacunas apresentadas neste campo. Para o preenchimento deste campo, utilizaram-se os valores reconhecidos por defeito pelo NA: se o campo tiver valor nulo, a circulação é feita nos dois sentidos; se o campo tiver o valor FT, significando *From-To*, a circulação é feita somente no sentido de digitalização desse segmento de via; se o campo tiver o valor TF, de significado *To-From*, circula-se apenas no sentido oposto ao da digitalização desse troço.

- “Hierarchy” – este campo foi criado, de forma a dar indicação ao programa de quais as vias preferenciais para se transitar. Foram atribuídos valores de 1 até 4, sendo o que o valor 1 se refere a autoestradas e vias principais e por aí em diante. Estes valores foram atribuídos consoante o tipo de via em questão, identificado originalmente no campo “type”.
- “F_elev” / “T_elev” – estes campos foram criados para representar passagens desniveladas como pontes ou túneis. Estes campos foram preenchidos com base noutros dois campos, *bridge* e *tunnel*, que indicavam se um segmento de via era uma ponte ou um túnel, mas tal como aconteceu anteriormente, os dados encontravam-se bastante incompletos, tendo que ser feita uma análise para perceber onde existiam passagens desniveladas, sem que estas estivessem assinaladas. O campo T_elev é referente ao vértice final de um segmento de linha que se pretende que seja desnivelado, enquanto o campo F_elev é referente ao vértice inicial do segmento de linha seguinte, que ao anterior se une. Caso a situação a simular seja uma ponte, atribui-se o valor 1 aos dois campos, nos segmentos que representam a ponte, e o valor 0 aos campos da via inferior à ponte. Se o caso a simular for um túnel, atribui-se aos campos dos segmentos que simulam o túnel o valor 0, e à via superior os valores 1. Em segmentos de via que não existem passagens desniveladas, estes dois campos tomam valor nulo.

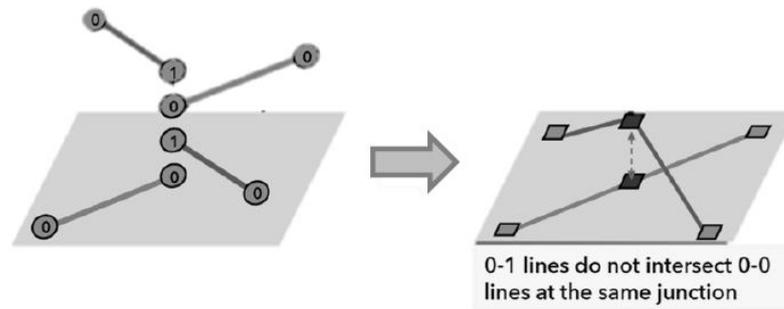


Figura 3.2 - Representação de passagens desniveladas (Adaptado de Salgado, 2020)

- “Meters” – este campo foi criado para indicar o comprimento, em metros, de cada segmento de via representado na rede. Os valores foram automaticamente preenchidos por uma função do *ArcGIS* que calcula a geometria de determinados elementos, tendo sido escolhido o campo comprimento, relativo às linhas que constituem a rede.
- “Speed” – o campo speed foi criado para representar a velocidade média de circulação em cada troço de via, em km/h, estimado consoante as velocidades indicadas no campo *maxspeed*, presente originalmente nos atributos da rede, e também consoante o tipo de via. Para os troços de via que careciam de informação, optou-se por analisá-los via *Street View* do *Google Maps*, de forma a atribuir uma velocidade coerente com a via em questão.
- “Minutes” – este campo destina-se a indicar o tempo que o veículo demora a percorrer determinado troço, em minutos. Foi calculado a partir da velocidade estipulada e do comprimento do troço em questão, valores representados em campos que foram enunciados anteriormente, pela seguinte fórmula:

$$"Minutes" = \left(\frac{"Meters"}{1000} \right) * \left(\frac{60}{"Speed"} \right)$$

A figura que se segue demonstra uma parte da rede viária do concelho, depois de ser atualizada conforme descrito anteriormente.

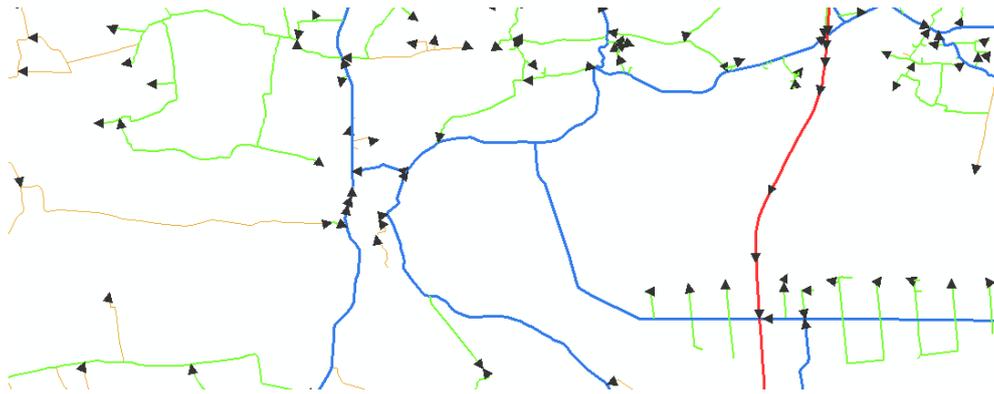


Figura 3.3 - Parte da rede viária do concelho, representada no programa ArcGIS

As linhas assinalam os segmentos de via e as suas diferentes cores representam os diferentes níveis de hierarquia, de forma a facilitar a interpretação – autoestradas e estradas principais estão representadas a vermelho, estradas secundárias representadas a azul, estradas terciárias a verde e por último, os caminhos rurais e troços de acesso a propriedades estão representados a castanho. Em relação às setas a preto, estas indicam o sentido em que cada linha foi digitalizada, o que auxiliou na atribuição dos sentidos de circulação.

3.5 PREPARAÇÃO DOS ATRIBUTOS DOS CONTENTORES

As tabelas de atributos das *shapefiles* dos contentores, disponibilizadas pela CMS, já continham uma série de campos que dizem respeito à gestão feita pela câmara, como as coordenadas do local, a freguesia em que se localiza, o código do ponto de recolha, a tipologia do contentor ou a volumetria, entre outros.

Porém, de maneira a permitir ao *Network Analyst* ter os dados necessários à otimização, foi necessário inserir alguns novos campos nas tabelas de atributos dos contentores, indicados de seguida:

- “LADO” – o campo lado foi inserido para atribuir o lado em que o contentor teria de estar em relação ao veículo de recolha, de forma a ser recolhido;
- “QTD” – os campos QTD indicam a quantidade a recolher em determinado contentor, essa quantidade é atribuída tendo em conta o valor mensal de

resíduos a recolher por determinada rota, sendo influenciada também pela periodicidade de recolha do contentor;

- “TEMPO_REC” – este campo é relativo ao tempo que um contentor demora para ser recolhido, pois este também será uma variável de entrada para a aplicação VRP.

Em relação ao lado de aproximação do veículo ao contentor, existem 4 opções que podem ser definidas para preencher esse campo:

- O valor 0 indica que o veículo pode encontrar o contentor em qualquer um dos lados e de seguida decidir o caminho a seguir de modo a minimizar a impedância, ou seja, pode seguir na mesma direção ou fazer inversão de marcha.

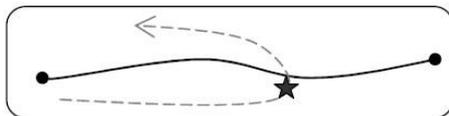


Figura 3.4 - Aproximação do veículo ao contentor: ambos os lados (Silva, 2009)

- O valor 1 indica que o veículo tem de recolher o contentor estando este à sua direita e é obrigado a continuar na mesma direção;

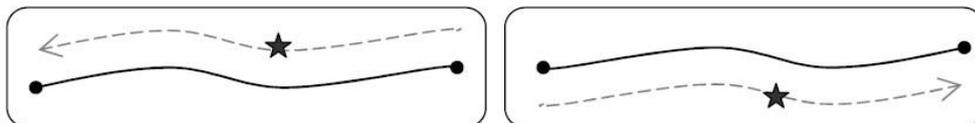


Figura 3.5 - Aproximação do veículo ao contentor: lado direito do veículo (Silva, 2009)

- O valor 2 segue a mesma lógica do anterior só que o contentor estará no lado esquerdo;

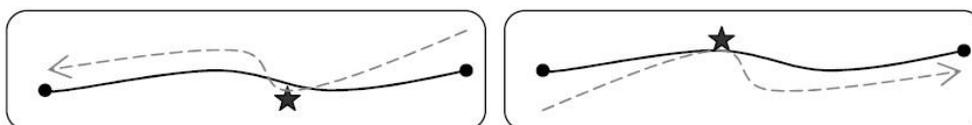


Figura 3.6 - Aproximação do veículo ao contentor: lado esquerdo do veículo (Silva, 2009)

- O valor 3 indica que o contentor poderá ser encontrado em qualquer um dos lados do veículo, mas após recolhê-lo não pode inverter a marcha, seguindo obrigatoriamente na mesma direção.

A quantidade a recolher em cada contentor foi deduzida da quantidade mensal registada na rota em que um dado contentor se insere. A partir da quantidade mensal de determinada rota obtém-se a quantidade diária, que se vai dividir pela capacidade total disponível nessa rota, conforme se apresenta no capítulo 4, para se obter a quantidade de resíduos a recolher no contentor. Uma vez que as quantidades mensais estão registadas em toneladas e a capacidade de contentorização é avaliada em litros, foi necessário utilizar um peso específico médio para os resíduos indiferenciados, que neste caso foi 234 kg/m^3 (Algar, 2018). Dentro da mesma rota, as quantidades a recolher só variam entre contentores conforme a periodicidade de recolha de cada um, sendo uma limitação o fato de não se conhecer que locais produzem mais ou menos resíduos dentro do mesmo circuito.

Em relação ao tempo de recolha de cada contentor assumiu-se 20 segundos para contentores individuais, os de 110 e 120 litros, e 35 segundos para os coletivos, de 800 e 1100 litros (Carvalho, 2008). O mesmo autor assumiu como tempos de paragem e de aceleração, 6 segundos cada. Tendo isto em conta, assumiu-se para os contentores individuais 32 segundos e para os coletivos 47 segundos. Como a variável para o tempo de descarga a inserir no *Network Analyst* está configurada para minutos, atribuiu-se para os contentores individuais 0,55 e para os coletivos 0,8 minutos, respetivamente. Em relação aos contentores enterrados, assumiu-se um tempo de descarga de 1 minuto e 45 segundos (Sotkon, 2020). Com os respetivos 6 segundos de paragem e aceleração, assumiu-se um tempo de recolha de 1,95 minutos para contentores enterrados do tipo Sotkon.

3.6 PREPARAÇÃO DA NETWORK DATASET

Uma vez configurados os atributos relativos à rede viária e também aos contentores, é necessário criar uma *Network Dataset*, que é o formato de rede do *ArcGIS* que estabelece conectividade entre cada um dos troços da rede viária e os respetivos nós.

No *Network Analyst* a rede divide-se em três elementos, as arestas (*edges*), os nós (*junctions*) e as curvas (*turns*). O local onde as linhas se cruzam é representado pelos nós, que numa rede viária coincide com o cruzamento das ruas. As arestas correspondem precisamente às ruas, pelas quais se transita, sendo que cada uma tem um custo associado. Por fim, as curvas indicam os movimentos que podem ou não ser feitos entre as várias arestas. As arestas e os nós, principalmente, são essenciais na estrutura de qualquer rede (Salgado, 2020).

Foi na criação da *Network Dataset* que foram assumidos os atributos relativos à rede viária, descritos anteriormente, que caracterizam a forma como se circula ao longo da rede. Nas figuras que se seguem é possível ver os vários passos na elaboração da *Network Dataset*:

- *Feature classes* que fazem parte da *Network Dataset* criada;

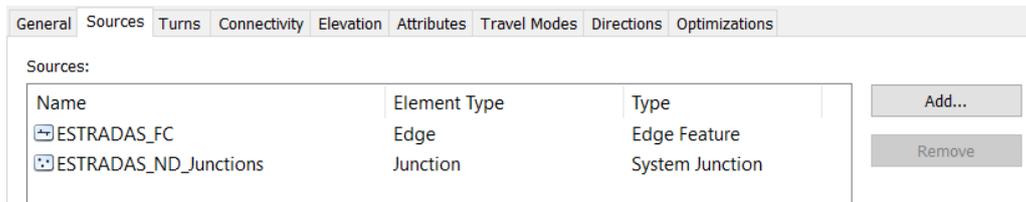


Figura 3.7 - *Feature classes* da *Network Dataset* criada

- Definição de conectividade na rede, em todos os locais que a *feature class* da rede viária se toque;

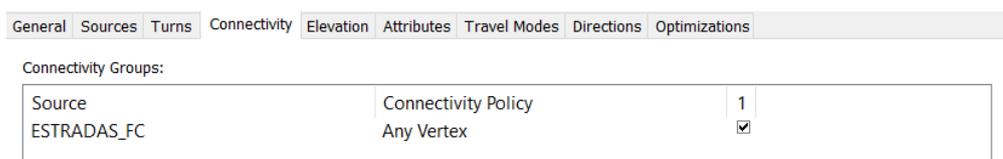


Figura 3.8 - Conectividade da rede

- Seleção dos campos da *feature class* da rede viária que definem as passagens desniveladas;

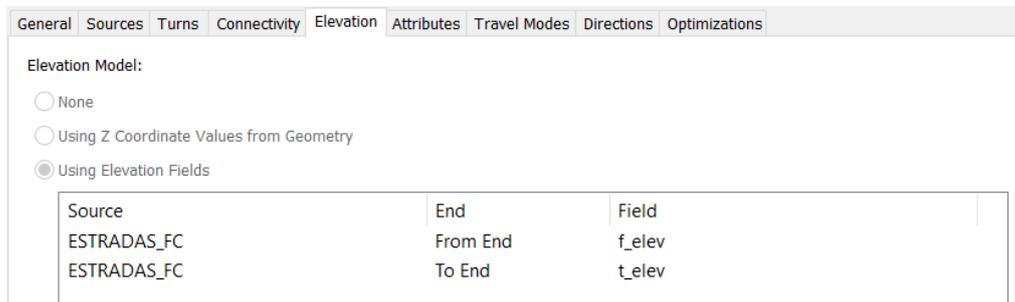


Figura 3.9 - Atribuição dos campos que indicam passagens desniveladas

- Indicação dos atributos utilizados na rede: hierarquia de vias, distância dos troços, tempo para percorrer cada troço e restrição nas vias de sentido único.

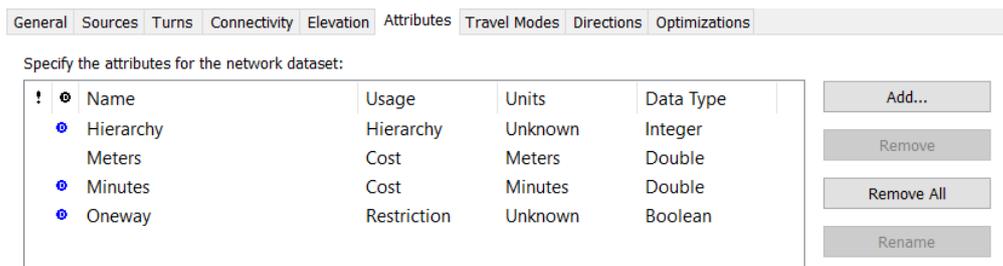


Figura 3.10 - Atributos utilizados na rede criada

3.7 NETWORK LOCATIONS

Para correr o *Network Analyst*, além da criação da *Network Dataset*, como já foi apresentado, é necessário também fornecer à aplicação as *Network Locations*, onde se incluem os pontos de recolha (*orders*), os pontos de partida e descarga dos circuitos (*depots*).

Em primeiro lugar, os *orders*, correspondem aos locais de recolha, e é com base nestes pontos que os circuitos são estabelecidos.

Ao adicionar os contentores a recolher à classe *orders*, foi necessário atribuir às propriedades desta categoria os respetivos campos (explicados no ponto 3.5), em cada um dos ficheiros dos contentores. Atribuiu-se o tempo de recolha de cada contentor, a

quantidade a recolher em cada um e o lado de aproximação ao contentor, como se explicou anteriormente.

Location Analysis Properties		
Property	Field	Default Value
Name		
Description		
ServiceTime	TEMPO_REC	
TimeWindowStart1		
TimeWindowEnd1		
TimeWindowStart2		
TimeWindowEnd2		
MaxViolationTime1		
MaxViolationTime2		
InboundArriveTime		
OutboundDepartTime		
DeliveryQuantities		
PickupQuantities	QTD_SEG	
Revenue		
SpecialtyNames		
AssignmentRule		Override
RouteName		
Sequence		
CurbApproach	LADO	Either side of vehicle

Figura 3.11 - Atribuição de variáveis na classe orders das Network Locations

Em relação à classe *depots*, esta corresponde aos pontos de início e descarga do circuito, neste caso, a partida é do parque de viaturas da CMS e a chegada é ao Aterro Sanitário do Barlavento. Foi estipulado o tempo de 12 minutos para descarga em aterro (Carvalho, 2008). Os turnos terminam no parque de viaturas da CMS, mas como o NA não contabiliza essa viagem, que demora cerca de 15 minutos para percorrer 11km, descontou-se esse tempo ao tempo máximo previsto para a realização dos circuitos.

Os dois locais estão representados na figura que segue, sendo que o parque de viaturas está representado a vermelho, localizado na cidade de Silves, e o AS representado a verde, dado que este último se situa já fora do concelho.

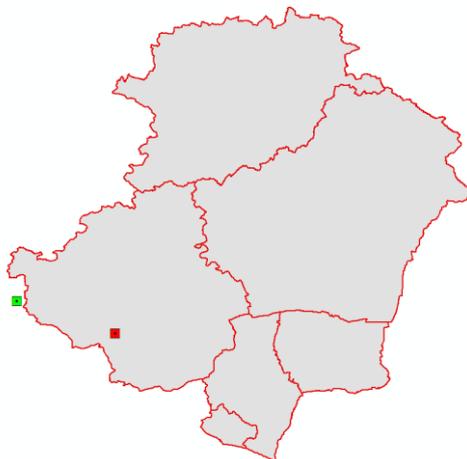
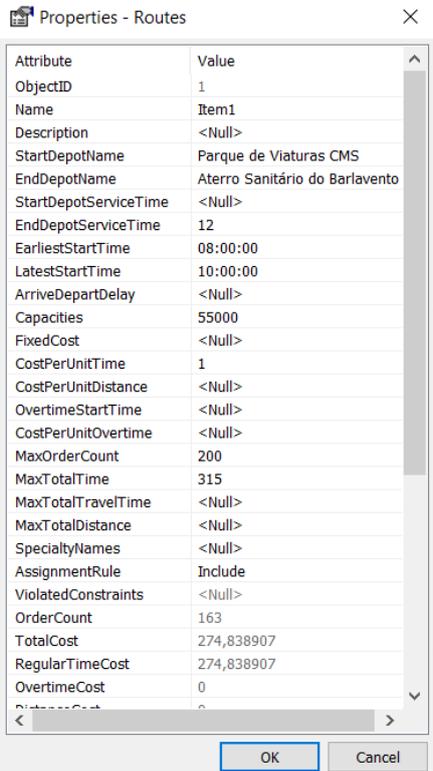


Figura 3.12 - Localização dos depots, no contexto geral do concelho

3.8 PRESSUPOSTOS ASSUMIDOS

Antes de iniciar a otimização dos diferentes cenários foram assumidos alguns pressupostos base, comuns a todos os circuitos, que foram inseridos na janela de atributos relativos ao percurso da aplicação VRP, como se pode ver na figura.



Attribute	Value
ObjectID	1
Name	Item1
Description	<Null>
StartDepotName	Parque de Viaturas CMS
EndDepotName	Aterro Sanitário do Barlavento
StartDepotServiceTime	<Null>
EndDepotServiceTime	12
EarliestStartTime	08:00:00
LatestStartTime	10:00:00
ArriveDepartDelay	<Null>
Capacities	55000
FixedCost	<Null>
CostPerUnitTime	1
CostPerUnitDistance	<Null>
OvertimeStartTime	<Null>
CostPerUnitOvertime	<Null>
MaxOrderCount	200
MaxTotalTime	315
MaxTotalTravelTime	<Null>
MaxTotalDistance	<Null>
SpecialtyNames	<Null>
AssignmentRule	Include
ViolatedConstraints	<Null>
OrderCount	163
TotalCost	274,838907
RegularTimeCost	274,838907
OvertimeCost	0
DistanceCost	0

Figura 3.13 - Atributos por percurso

De um modo geral, os campos a que se atribuíram valores foram:

- Os locais de início e fim de circuito, sendo que os percursos começam no Parque de Viaturas da CMS e terminam no Aterro Sanitário do Barlavento;
- Foi definido um tempo de descarga em aterro de 12 minutos;
- A capacidade definida para a viatura de recolha foi 55 m³, sendo que as viaturas têm 22 m³ de capacidade e assumindo uma taxa de compactação de 2.5, perfazendo a disponibilidade para recolher os 55 m³;
- Atribuiu-se ao número máximo de contentores a recolher o valor 200 apenas porque este valor nunca é atingido, não impondo assim um limite ao software;
- O tempo total para a realização de cada circuito situou-se nos 315 minutos (5:15h), descontando ao turno de 6 horas de trabalho, meia hora para pausa dos

trabalhadores e 15 minutos para efetuar o trajeto do AS até ao parque da CMS, visto que o NA não inclui este trajeto nas simulações.

É de salientar que a atribuição dos pontos de recolha aos diversos circuitos modelados se baseou em informações fornecidas pela CMS, como tabelas que indicam os aglomerados populacionais a visitar em cada circuito atual, mas também informações relativas à periodicidade requerida em certos locais que não se conhece o circuito em que estão inseridos.

Posto isto, o grau de certeza relativo à recolha de determinado contentor/grupo de contentores num respetivo circuito é maior nuns circuitos do que noutros, mas não tendo conhecimento do circuito exato nem da sequência de recolha efetuada atualmente em qualquer um dos circuitos, daí a relevância desta otimização.

4 ESTUDO DE CASO: CONCELHO DE SILVES

O estudo desenvolvido neste trabalho tem como base o concelho de Silves, que se localiza no Algarve, Portugal, e abrange cerca de 16% da superfície da região. É constituído por seis freguesias e é limitado a Norte pelo Alentejo e a Sul pelo Oceano Atlântico (CMS, 2016).



Figura 4.1 - Localização do concelho de Silves (Visitar Portugal, 2018)

De acordo com a CMS (2016), neste concelho é possível encontrar diferentes realidades no que toca à ocupação e uso do solo, aspetos socioeconómicos, demográficos e culturais, que permitem dividir o concelho em:

- “Serra, cuja ocupação é de cerca de 50% da superfície regional, apresenta solos pobres e reduzida utilização agrícola, o que provoca uma progressiva desertificação ecológica e humana”;
- “Barrocal, que constitui cerca de 25% da área regional, tem solos com boa aptidão hidrológica e elevada capacidade agrícola, apesar da existência de inúmeros afloramentos rochosos”;
- “Litoral, que corresponde a uma estreita faixa junto à costa, onde se encontra a maior parte da atividade económica regional e os principais centros urbanos”.

Silves é um concelho extenso, onde se consegue distinguir claramente as sub-regiões anteriormente descritas. Localizado a 55 km de Faro, à entrada do Barlavento Algarvio o concelho ocupa uma área de cerca de 679,41 km² e é constituído pelas seguintes

freguesias: Armação de Pêra, Alcantarilha e Pêra, Algoz e Tunes, Silves, São Bartolomeu de Messines e São Marcos da Serra (CMS, 2016).

4.1 ASSIMETRIAS – SAZONALIDADE E DESERTIFICAÇÃO

Além de se caracterizar pela sua extensão, abrangendo uma área desde o Alentejo até ao litoral algarvio, o concelho de Silves apresenta fortes assimetrias internas que resultam em problemas como a sazonalidade e a desertificação (CMS, 2016).

No que respeita à sazonalidade, esta é considerada transversal, mas manifesta-se de forma mais visível nas freguesias de Armação de Pêra e de Alcantarilha e Pêra. Dos problemas inventariados, destacam-se aqueles que mais diretamente afetam/atingem as populações, marcadas pelo emprego sazonal:

- A população é afetada em termos de emprego e as consequências que daí advêm prendem-se com a desocupação profissional e a dependência sistemática do subsídio de desemprego, durante seis meses do ano;
- A desresponsabilização, quer dos empregados, quer dos empregadores, relativamente à manutenção das catividades e aos compromissos assumidos com as entidades públicas, nomeadamente a Segurança Social;
- Afetação de outras áreas da Ação Social, nomeadamente o recurso a prestações sociais, decorrentes do estatuto de desempregado;
- Ausência de estímulos à formação desta franja da população, desqualificada profissionalmente.

Quanto à desertificação, a zona Serrana assistiu a um decréscimo demográfico ao longo dos últimos 30 anos, o que se deve à menor presença de população jovem e potencialmente ativa, o que se deve ao significativo fluxo migratório. Verifica-se assim, um envelhecimento da estrutura populacional e uma forte tendência para a desertificação, relativamente à zona litoral que foi favorecida pelo importante fluxo migratório (CMS, 2016).

Silves é uma zona de grandes potencialidades turísticas, uma vez que este sector demonstra ser muito importante na economia da região. Porém, o crescimento por vezes descontrolado, assim como o aparecimento de uma oferta sobretudo direcionada para o produto sol e praia, implicam condições de competitividade que comprometem a qualidade dos serviços prestados e também a imagem da região. O emprego na região tem características de sazonalidade e os contratos de trabalho tendem em terminar no início do quarto trimestre (CMS, 2016).

4.2 POPULAÇÃO

Segundo a CMS (2016), o concelho de Silves apresenta uma população total residente de 37126 pessoas, com uma densidade populacional de 54,6 indivíduos por km².

Freguesias	ÁreaKm2	Densidade Populacional	Peso da População Residente %	População Total Residente 2001	População Total Residente 2011
Alcantarilha e Pêra	46,3	107,5	6,8%	2347 + 1951 4298	2540 + 2432 4972
Algoz e Tunes	44,9	144,6	6,6%	2946 + 2022 4968	3831 + 2660 6491
Armação de Pêra	8,0	609,1	1,2%	3770	4867
São Bartolomeu de Messines	239,9	35,1	35,3%	8491	8430
São Marcos da Serra	166,1	8,1	24,4%	1535	1352
Silves	175,0	62,9	25,7%	10768	11014
Total Concelho	680,1	54,6	100	33830	37126

Figura 4.2 - Caracterização demográfica do concelho de Silves (CMS, 2016).

A freguesia que registou maior aumento de população foi Armação de Pêra, seguida da União de Freguesia de Alcantarilha e Pêra e da Freguesia de Silves, por outro lado, as restantes freguesias/união de Freguesia sofreram uma diminuição no número de residentes (CMS, 2016).

Silves e São Bartolomeu de Messines são as freguesias mais populosas do concelho e as que maior área geográfica ocupam.

É notória a baixa densidade populacional nas freguesias localizadas na Serra, e por outro lado, a elevada densidade populacional apresentada na freguesia de Armação de Pêra.

4.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO CONCELHO

Segundo a FFMS (2020), no concelho de Silves em 2018 foram recolhidas 28 451 toneladas de resíduos, 20 380 de forma indiferenciada e 8 070 seletivamente.

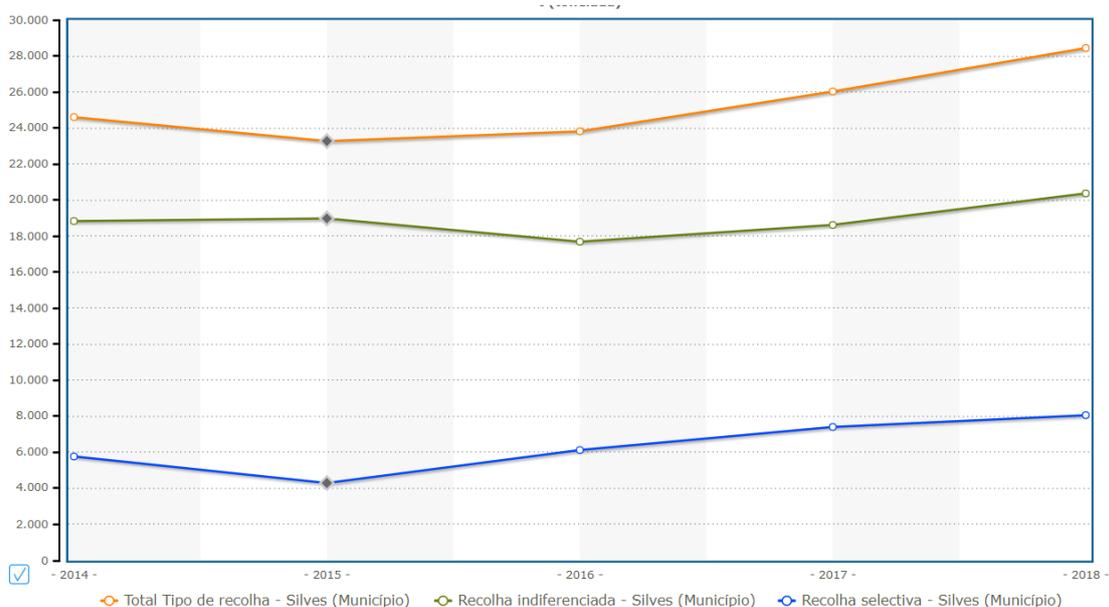


Figura 4.3 - Evolução das quantidades recolhidas em toneladas, no concelho de Silves, de 2014 a 2018 (FFMS, 2020)

No gráfico anterior é perceptível a tendência de crescimento nas quantidades recolhidas a partir de 2015, sendo que 2017 para 2018 o aumento na quantidade total foi de cerca de 9%, aumentos que também se refletem nos dois tipos de recolha.

Da quantidade total recolhida em 2018 no município, indiferenciadamente e seletivamente, 25 903 toneladas tiveram como destino final o aterro, mais de 90% do total, enquanto a percentagem restante se destinou a reciclagem e valorização orgânica, sendo a percentagem reciclada cerca do dobro da valorizada organicamente (FFMS, 2020).

No que toca à quantidade recolhida anualmente por habitante, o concelho de Silves registou em 2018 o valor médio de 785,6 kg/hab (FFMS, 2020).

4.4 SISTEMA DE RECOLHA E CONTENTORIZAÇÃO DO CONCELHO

Relativamente ao sistema de gestão e recolha de resíduos, atualmente a recolha indiferenciada é responsabilidade da CMS, enquanto o sistema de recolha seletiva é gerido pela Algar.

A recolha indiferenciada de resíduos, a cargo da CMS, realiza-se em dois grupos de circuitos diferentes: os que recolhem contentores de superfície e os que recolhem contentores enterrados. Os circuitos que visam recolher os contentores de superfície realizam-se de segunda-feira a sábado, durante o ano inteiro, enquanto os circuitos de enterrados requerem um ajuste no verão, passando de segunda-feira a sábado para uma recolha efetuada todos os dias da semana, inclusive ao domingo, devido ao aumento da quantidade a recolher em zonas urbanas principalmente.

Os contentores de superfície dividem-se em quatro tipos, consoante o seu volume: 110, 120, 800 e 1100 litros, conforme demonstra a próxima figura.



Figura 4.4 - Contentores de superfície: 110, 120, 800 e 1100 litros (Google, 2020).

Os contentores de pequena dimensão, de 110 e 120 litros, são encontrados maioritariamente em áreas rurais e são característicos do tipo de recolha porta-a-porta. Já os contentores de 800 e 1100 litros encontram-se um pouco por todo o concelho, tanto em áreas rurais como urbanas.

Por sua vez, os contentores enterrados dividem-se em três tipos: *Sotkon* de 3000 litros e *Molok* de 3000 e 5000 litros, apresentados na figura seguinte.



Figura 4.5 - Contentores enterrados: Sotkon de 3000 litros e Molok de 3000 e 5000 litros (Google, 2020)

Este tipo de contentores é característico de áreas mais urbanas, não só pela maior quantidade de resíduos que conseguem alocar, mas também pela sua estética, enquadrando-se de forma positiva no meio urbano e ocupando menos espaço na via pública.

Os contentores *Sotkon*, apesar de serem classificados como contentores enterrados, têm a particularidade de serem recolhidos pelo mesmo tipo de veículo que recolhe os contentores de superfície, ou seja, incluem-se nos circuitos de recolha de contentores de superfície.

Os dados relativos à localização e características de cada equipamento de deposição foram disponibilizados pela CMS, dados esses georreferenciados e praticamente atualizados à data de início da realização deste trabalho. Os dados encontravam-se organizados em *shapefiles* do *ArcGIS*, tanto de contentores como também de pontos de recolha.

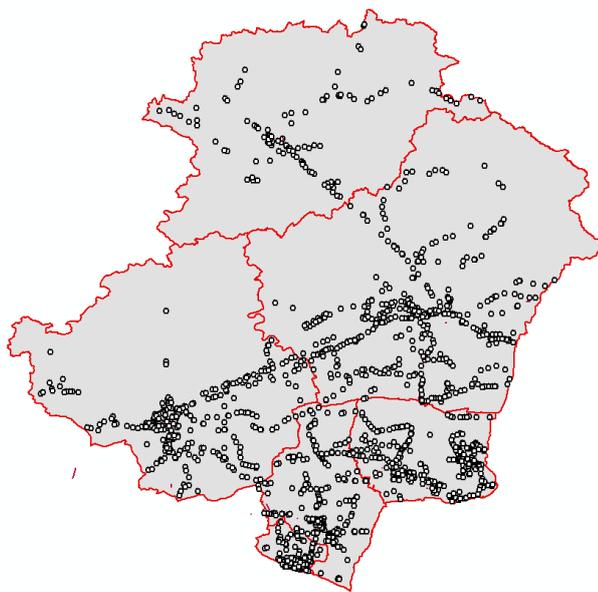


Figura 4.6 - Distribuição dos equipamentos de deposição pelo concelho

Decidiu-se ter como foco de otimização os circuitos de contentores de superfície dedicados à recolha indiferenciada de resíduos, face ao maior desconhecimento por parte da CMS da forma como se realizam os diversos percursos e também devido às assimetrias que se verificam entre eles, como as periodicidades de recolha e taxas de enchimento.

Os circuitos estão agrupados em diferentes rotas, sendo que atualmente existem 5 rotas para recolher contentores de superfície, sendo estas o foco desta otimização, cada uma a englobar vários circuitos, realizados consoante o dia da semana.

As rotas de Algoz/Tunes, Messines e S. Marcos têm atualmente três circuitos que se realizam duas vezes por semana cada um, enquanto Armação tem apenas dois que se executam três vezes por semana cada. Na rota de Silves não se conhece o atual funcionamento, pelo que vai ser otimizada distribuindo os contentores de maneira uniforme pelos circuitos e tendo em conta periodicidades conhecidas, indicadas pela CMS.

Foi possível deduzir a capacidade disponível em cada uma dessas rotas, que se apresenta na tabela seguinte.

Tabela 4.1 - Contentores e capacidade disponível de cada rota

	Nº Contentores	Capacidade disponível (m³)
Algoz/Tunes	438	327,9
Armação	325	277,6
Silves	303	255,9
Messines	400	329,1
S. Marcos	384	308,5
Total	1850	1498,9

A CMS disponibilizou também um ficheiro com os valores mensais recolhidos indiferenciadamente nos primeiros 9 meses de 2018, para cada uma das rotas de contentores de superfície.

Tabela 4.2 - Quantidades mensais recolhidas indiferenciadamente, nos 9 primeiros meses de 2018

	Quantidades recolhidas (ton/mês)								
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Algoz e Tunes	180,4	153,9	201,0	194,2	206,3	203,6	222,7	237,1	189,8
Armação	156,6	140,8	178,8	179,6	186,1	192,0	250,5	306,2	209,0
Silves	204,9	171,9	200,7	216,5	211,9	220,4	260,8	311,9	237,8
Messines e S. Marcos	149,4	134,1	167,5	170,3	176,8	161,1	178,2	199,2	164,6
Total	691,4	600,6	748,0	760,7	781,0	777,1	912,2	1054,4	801,3

Uma das limitações é o facto de serem conhecidos apenas valores dos primeiros 9 meses do ano, contudo dá para perceber a variação dos valores ao longo desse tempo. A outra limitação é relativa aos valores de Messines e S. Marcos, que anteriormente eram recolhidos e contabilizados em conjunto, e à data de início da dissertação essas rotas já eram realizadas separadamente. De forma a conseguir obter valores para cada uma, usou-se como proporção a população abrangida, sendo que se atribuiu a Messines 60% do respetivo valor mensal e a S. Marcos os restantes 40%, isto para efeitos de cálculo de quantidades a recolher em cada uma das rotas.

Quanto aos veículos de recolha, dado que a CMS indicou que a maioria dos veículos da sua frota tem 22 m³ de capacidade, foi esse o limite de capacidade atribuído ao veículo nas simulações de otimização. Quanto à taxa de compactação do veículo, assumiu-se 2,5 (Silva, 2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das diferentes simulações feitas, de modo a perceber qual o conjunto de circuitos que apresenta melhores resultados, ou seja, o que minimize as distâncias a percorrer e as durações dos circuitos tanto quanto possível.

Em todas as rotas foram simulados os vários circuitos, relativos aos diferentes dias da semana, e descritos os principais resultados como a distância percorrida, o tempo de execução do circuito e a quantidade de resíduos recolhida.

5.1 CENÁRIO 1

Neste primeiro cenário utilizaram-se as condições inicialmente estabelecidas, que se julgava serem as ideais à partida, para perceber a forma como seriam gerados os circuitos.

Estas simulações caracterizam-se essencialmente por não ter sido definido um lado de aproximação da viatura para a maioria dos pontos de recolha, deixando que o VRP decida qual a melhor solução. Como já foi descrito anteriormente, existem duas opções a atribuir aos pontos de recolha que permitem ao software decidir qual o melhor lado de aproximação da viatura:

- A opção “No U-turn”, que permite recolher um ponto em qualquer um dos lados do veículo, mas não permite que seja feita inversão de marcha. Esta foi utilizada em todas as estradas em que o veículo consegue recolher tanto à direita como à esquerda da via, sem efetuar inversão de marcha;
- A outra opção é “Either side of vehicle”, que também permite recolher dos dois lados da viatura, porém autoriza a inversão de marcha imediatamente após recolher um ponto. Atribuiu-se esta opção a locais amplos que tenham espaço suficiente para inverter a marcha e também em ruas sem saída por exemplo.

Uma exceção a isto são os pontos de recolha que se localizam em estradas principais, como a N125 ou o IC1, sendo que nestes locais definiu-se que o ponto de recolha teria de estar obrigatoriamente à direita da viatura.

De seguida são apresentados os resultados obtidos para os vários circuitos que constituem as rotas de recolha estabelecidas.

Nas figuras apresentadas, cada circuito é representado por uma cor diferente e os números assinalados em cada ponto indicam a sequência de recolha dentro do próprio circuito. Por exemplo, se um ponto de recolha estiver representado na figura com o número 5, significa que foram recolhidos 4 pontos no percurso até lá chegar.

ALGOZ/TUNES

A rota de Algoz/Tunes encontra-se dividida em três circuitos, cada um com duas recolhas semanais: o primeiro a efetuar-se à segunda e quinta-feira, o segundo à terça e sexta-feira e o terceiro à quarta-feira e sábado. A atribuição dos pontos de recolha desta área pelos três circuitos vai de encontro ao que foi indicado pela CMS, retratando a situação atual.

A figura seguinte apresenta os circuitos otimizados pelo VRP segundo as condições previamente descritas.

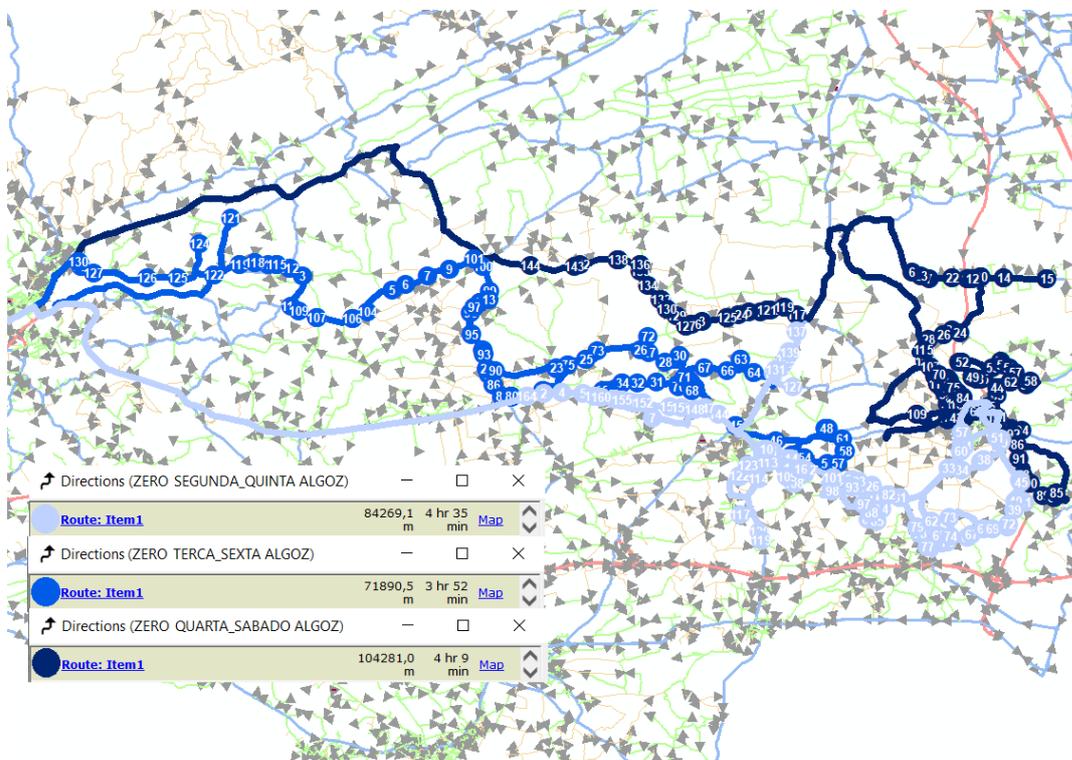


Figura 5.1 – Circuitos de Algoz/Tunes otimizados pelo cenário 1

Segundo a simulação do cenário 1, o percurso de segunda/quinta-feira percorre 84,3 km em 4 horas e 35 minutos, para recolher 48,5 m³ de resíduos à segunda e 36,4 m³ à quinta, distribuídos por 163 contentores.

No percurso de terça/sexta-feira são percorridos 71,9 km em 3 horas e 52 minutos, recolhendo à terça 44,7 m³ e à sexta 33,5 m³ de resíduos, em 132 contentores.

No terceiro circuito desta rota, realizado à quarta-feira e ao sábado, estimou-se uma distância percorrida de 104,3 km com uma duração de 4 horas e 9 minutos. À quarta-feira a quantidade a recolher é de 37,9 m³ de resíduos enquanto ao sábado é de 28,4 m³, num total de 143 contentores.

MESSINES

Como acontece na rota de Algoz/Tunes, esta rota de Messines também é constituída por três circuitos que se realizam duas vezes por semana cada um. A distribuição dos contentores desta rota pelos três circuitos também foi indicada pela CMS, de forma a retratar aproximadamente os circuitos atuais.

Na figura que se segue pode-se observar o resultado da otimização do VRP para os três circuitos desta rota.

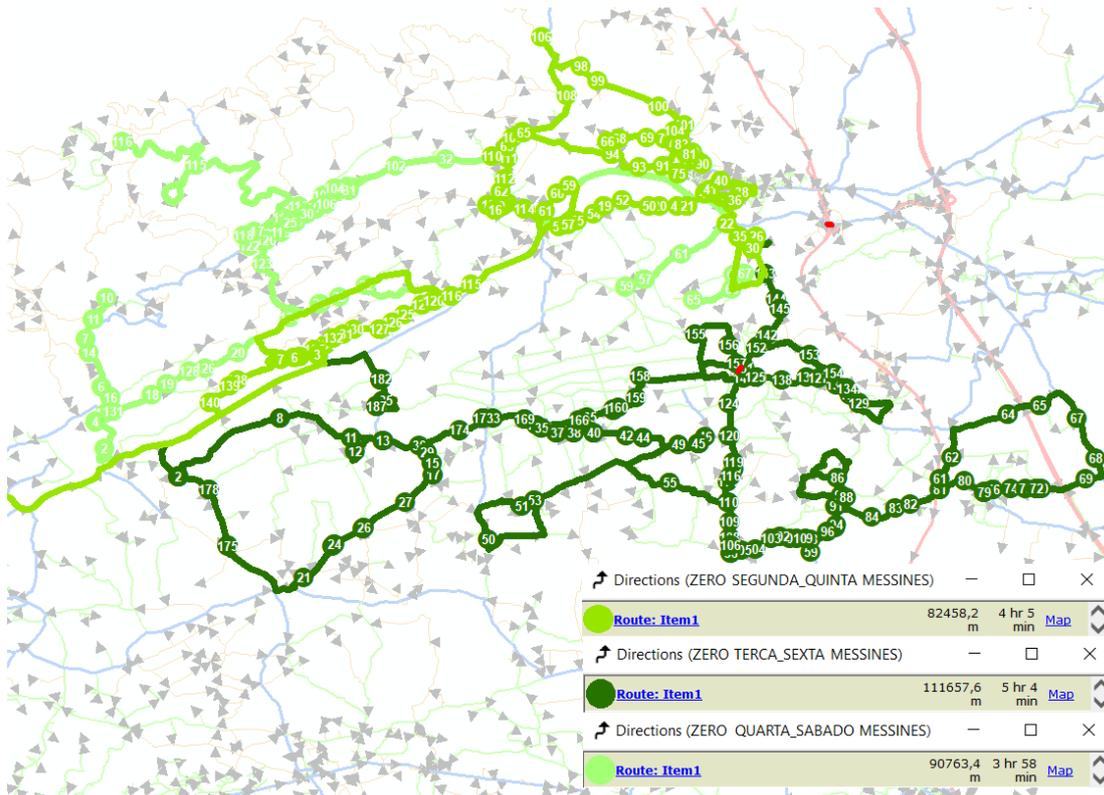


Figura 5.2 - Circuitos de Messines otimizados pelo cenário 1

Para o circuito de segunda/quarta-feira obteve-se uma distância percorrida de 82,5 km em 4 horas e 5 minutos. Este circuito tem para recolher 22,7 m³ de resíduos à segunda-feira enquanto à quinta-feira recolhe 14,6 m³, em 140 contentores.

No segundo circuito, realizado à terça e sexta-feira, a otimização estimou ter de percorrer 111,7 km em 5 horas e 4 minutos, tendo para recolher 189 contentores com cerca de 24,3 m³ e 18,3 m³ à terça e sexta-feira, respetivamente.

A simulação do último circuito de Messines resultou numa distância percorrida de 90,8 km em 3 horas e 58 minutos, destinado a recolher 18,5 m³ de resíduos à quarta e 16,5 m³ ao sábado, distribuídos por 131 contentores.

S. MARCOS DA SERRA

Neste grupo de circuitos encontram-se as primeiras diferenças quando se compara com os anteriores, teoricamente também existem três percursos que são realizados duas vezes por semana, o circuito de segunda-feira que se repete à quinta, o de terça-feira

que se repete à sexta e o de quarta-feira e sábado, sendo que a diferença está neste. Este último repete grande parte do percurso, mas difere um pouco em certa parte, parte essa que se destina a recolher contentores de periodicidade apenas semanal. Visto isso, as simulações foram feitas para quatro circuitos diferentes e não três, como tinha acontecido nos casos apresentados anteriormente.

Outra particularidade destes circuitos é que todos repetem um conjunto de contentores, localizados na estrada que o veículo de recolha tem de percorrer para os realizar, de Silves até São Bartolomeu de Messines.

Na figura são apresentados os resultados dos diferentes circuitos desta rota.

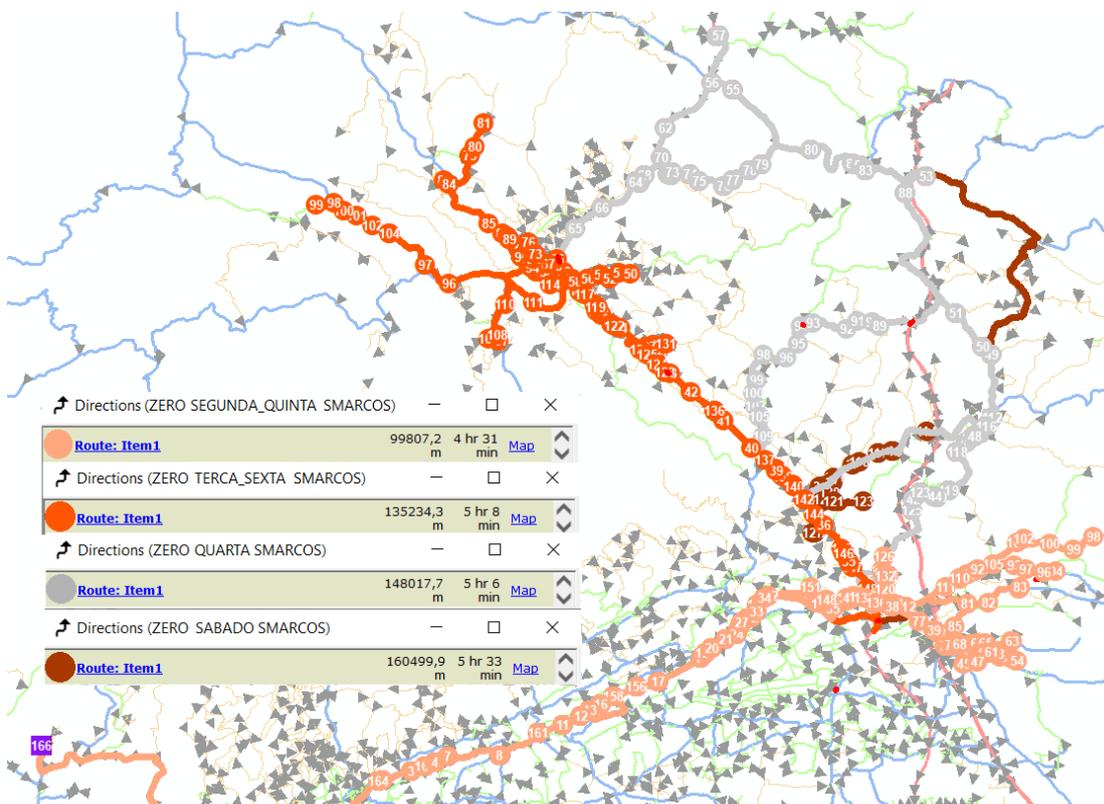


Figura 5.3 - Circuitos de S. Marcos otimizados pelo cenário 1

Para o circuito de segunda e quinta-feira calculou-se uma distância a percorrer de 99,8 km com uma duração de 4 horas e 31 minutos, com uma quantidade de resíduos a recolher à segunda-feira de 16,6 m³ e à quinta de 12,7 6 m³, distribuídos por 164 contentores.

A otimização para o circuito de terça e sexta-feira estimou uma distância a percorrer de 135,2 km em 5 horas e 8 minutos, circuito esse que inclui 162 contentores com 12,8 m³ de resíduos a recolher à terça-feira e 10,4 m³ a recolher à sexta.

Para o percurso de quarta-feira, assim como para o de sábado, estimaram-se as distâncias a percorrer mais longas até agora: 148,0 km em 5 horas e 6 minutos na quarta e 160,5 km em 5 horas e 33 minutos no sábado. O percurso de quarta visa recolher 12,8 m³ de resíduos em 148 contentores enquanto o de sábado 11,9 m³ em 160 contentores.

É de salientar que na primeira simulação feita para o circuito de sábado não foram recolhidos todos os contentores previstos, visto que este circuito ultrapassava em 18 minutos o tempo máximo atribuído inicialmente para os circuitos, que era de 315 minutos. Então, foi necessário aumentar o tempo previsto para o percurso nos atributos, de forma a que o circuito fosse terminado.

ARMAÇÃO DE PÊRA

Tendo em conta que os valores de resíduos a recolher utilizados nas simulações foram registados no mês de Agosto, a rota de Armação de Pêra é uma das que regista maior quantidade de resíduos a recolher, o que se deve se à alta ocupação turística nesta zona na época do Verão.

Existem dois circuitos a percorrer Armação de Pêra, que se realizam três vezes por semana cada um, um deles à segunda, quarta e sexta-feira e o outro à terça, quinta e sábado.

Na figura seguinte está apresentado o resultado da primeira otimização feita aos dois circuitos.

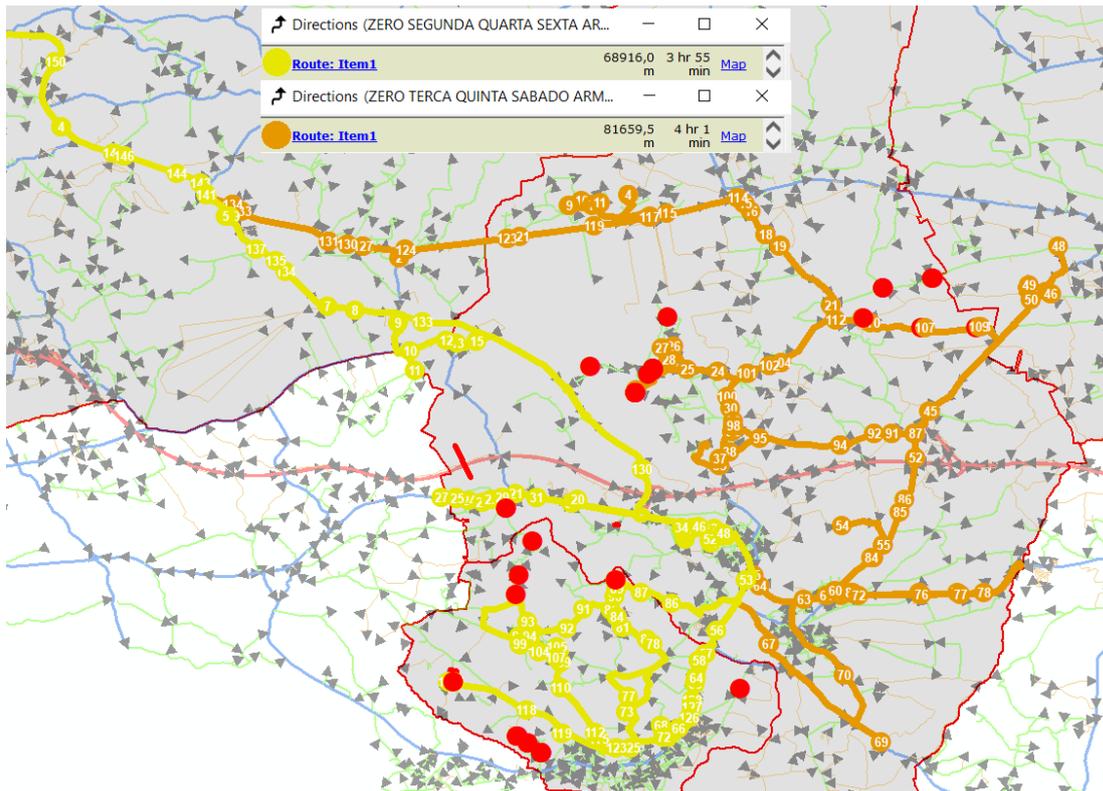


Figura 5.4 - Circuitos de Armação otimizados pelo cenário 1 – simulação 1

É possível constatar que ambos os circuitos não conseguiram recolher todos os contentores previstos, estando os que ficaram por recolher assinalados a vermelho na figura, neste caso não pelo tempo de duração, mas pela capacidade do veículo, pois estes circuitos, tanto à segunda como à terça, apresentam quantidades totais de resíduos a recolher superiores à que foi definida para o veículo de recolha inicialmente. O circuito de segunda-feira percorreu 68,9 km em 3 horas e 55 minutos, mas deixou por recolher 28 contentores, enquanto o circuito de terça percorreu 81km em 4 horas e 1 minuto deixando por recolher 13 contentores.

Posto isto, foi feita uma nova simulação para estes circuitos, atribuindo um ponto de descarga intermédio, também ele no AS do Barlavento e com duração de 12 minutos. O resultado da segunda simulação para estes circuitos apresenta-se de seguida.

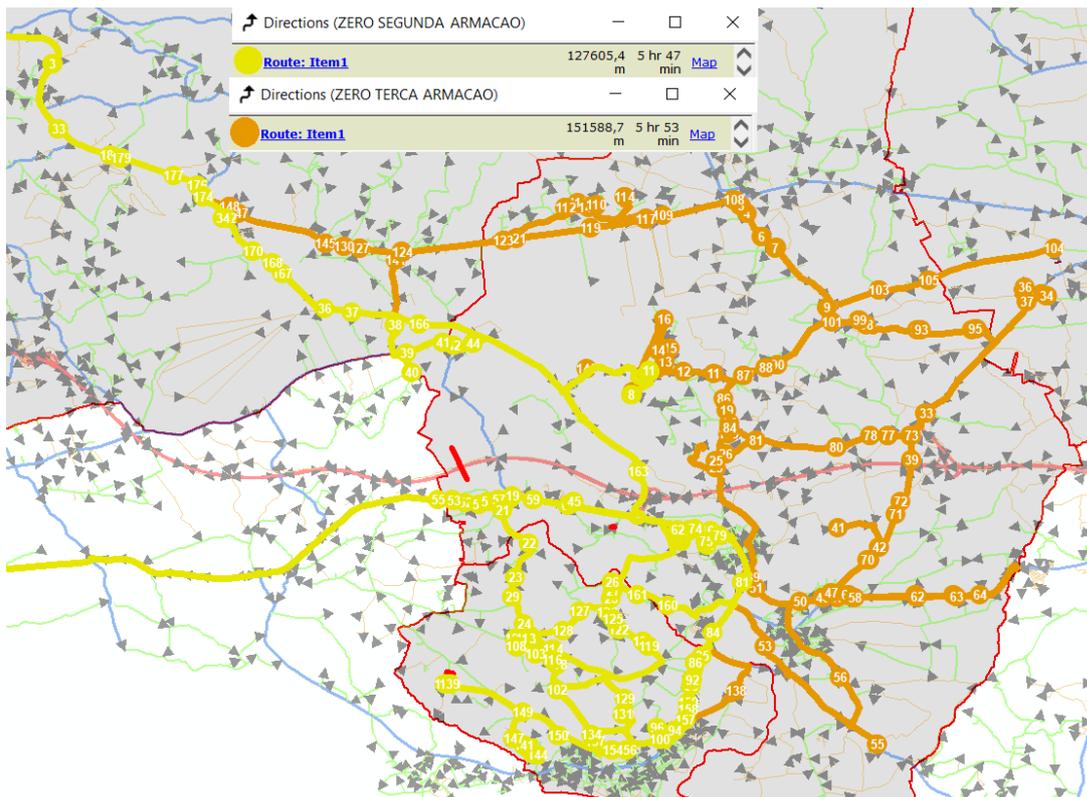


Figura 5.5 - Circuitos de segunda e terça em Armação otimizados pelo cenário 1

Nesta nova simulação constata-se que os contentores já foram todos recolhidos, porém as distâncias percorridas praticamente dobraram em relação à primeira simulação, devido à ida intermédia ao aterro para descarregar. Os tempos de duração dos circuitos também aumentaram, ultrapassando até o tempo estipulado inicialmente, as 5 horas e 15 minutos, pelo que foi necessário alterar o tempo máximo permitido para os percursos, de forma a que estes fossem terminados.

O circuito de segunda-feira para recolher 65,1 m³ de resíduos em 178 contentores percorreu 127,6 km em 5 horas e 47 minutos, enquanto o percurso de terça-feira, destinado a recolher 62,6 m³ de resíduos em 147 contentores, se fez em 151,6 km com uma duração de 5 horas e 53 minutos.

As quantidades a recolher por cada circuito eram superiores à capacidade de veículo de recolha apenas na primeira recolha de cada circuito, à segunda e terça respetivamente, portanto simularam-se os circuitos para quarta/sexta e para quinta/sábado, sem que tenham necessidade duma descarga intermédia, cujo resultado é apresentado de seguida.

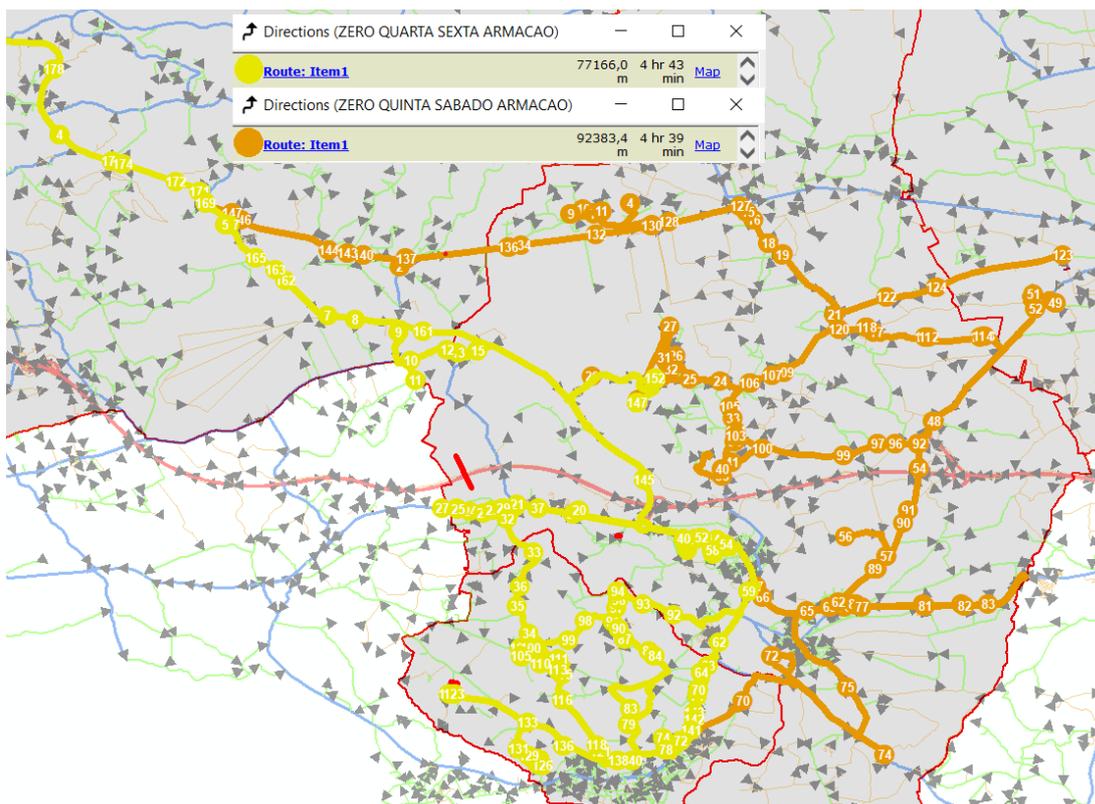


Figura 5.6 - Circuitos de quarta/sexta e quinta/sábado em Armação otimizados pelo cenário 1

O circuito otimizado de quarta e sexta estimou uma distância a percorrer de 77,2 km em 4 horas e 43 minutos, com 42,5 m³ de resíduos para recolher em cada um dos dias.

Para quinta e sábado estimou-se um circuito com 92,4 km com uma duração de 4 horas e 39 minutos, destinado a recolher 40,1 m³ de resíduos em cada dia.

SILVES

Silves, a par de Armação, regista um dos valores mais elevados de resíduos urbanos recolhidos no Verão, quando comparado com o resto do concelho. Nesta rota não é conhecida a divisão atual de circuitos, sendo apenas conhecida a área de abrangência dos circuitos que a percorrem. Optou-se assim por fazer uma divisão equilibrada dos contentores por três circuitos, que percorrem três áreas distintas, com a exceção da cidade de Silves e da estrada para o AS, que são recolhidas diariamente, ou seja, em todos os circuitos.

Os três circuitos criados destinam-se a fazer duas recolhas por semana cada, um realizado à segunda e quinta-feira, outro terça e sexta e o último à quarta e ao sábado.

Na primeira simulação realizada verificou-se que nos circuitos de segunda e quarta-feira a quantidade de resíduos a recolher ultrapassa a capacidade do veículo, pelo que houve necessidade de permitir que esses circuitos se deslocassem ao aterro a meio do turno para descarregar, como já tinha acontecido nos circuitos de Armação. Assim sendo, a figura seguinte já apresenta o resultado da segunda simulação feita aos circuitos.

Para facilitar a interpretação, os circuitos dividiram-se em dois grupos: um com segunda, terça e quarta-feira e outro com quinta, sexta e sábado.

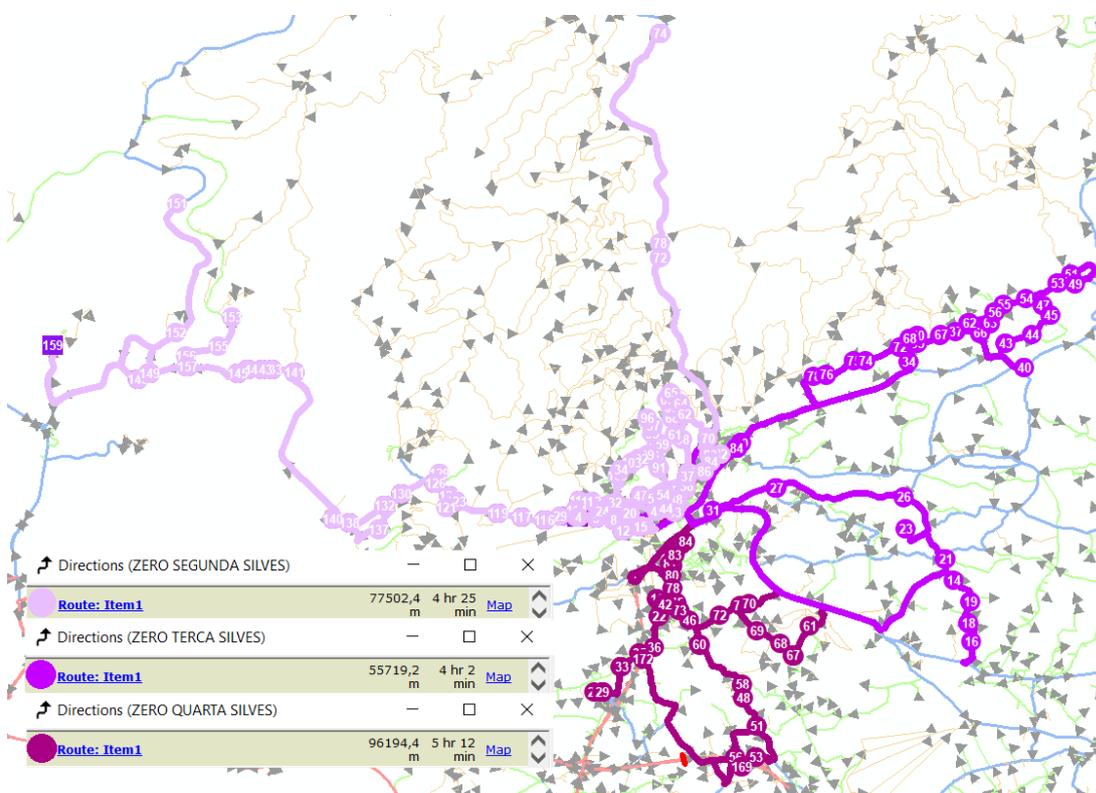


Figura 5.7 - Circuitos de segunda, terça e quarta-feira em Silves otimizados pelo cenário 1

O circuito estimado para segunda-feira percorre 77,5 km em 4 horas e 25 minutos, para recolher um total de 60,7 m³ em 156 contentores. A deslocação intermédia ao aterro ocorre depois de recolher 133 contentores, descarregando 53,3 m³, voltando depois para terminar o resto do percurso.

Para terça-feira a distância a percorrer fixou-se nos 55,7 km com uma duração de 4 horas e 2 minutos, para recolher 52,8 m³ em 168 contentores, sem necessitar de paragem a meio para descarregar.

O circuito simulado para quarta-feira foi o mais extenso e moroso destes, tendo para percorrer 96,2 km em 5 horas e 12 minutos. O circuito tem 173 contentores a armazenar 58,4 m³ de resíduos, sendo que a ida a meio ao aterro ocorre depois de recolher 53,5 m³ em 151 contentores.

De seguida apresentam-se os resultados para os circuitos de quinta, sexta e sábado.

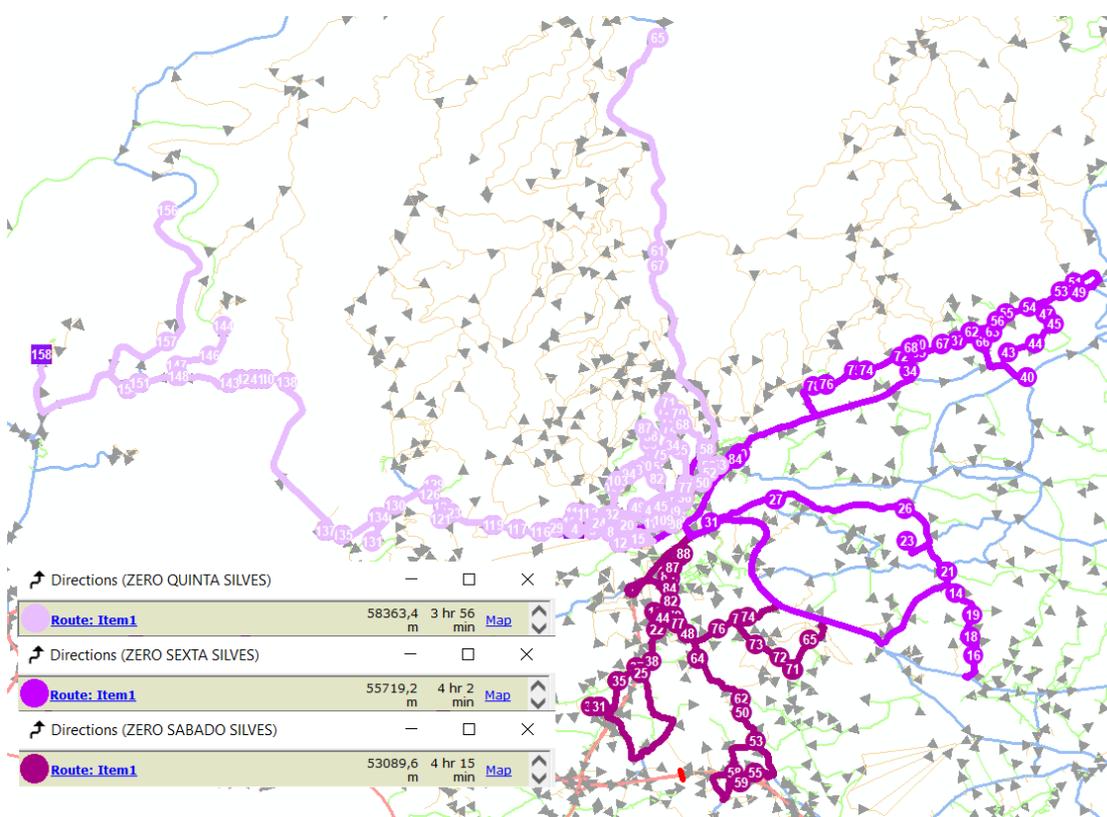


Figura 5.8 - Circuitos de quinta, sexta e sábado em Silves otimizados pelo cenário 1

O circuito de quinta estimou-se em 58,3 km e a demorar 3 horas e 56 minutos para recolher 38,5 m³.

O circuito a percorrer sexta-feira mantém-se igual ao de terça, alterando apenas a quantidade de resíduos a recolher, fixando-se agora nos 43,4 m³.

A simulação do último circuito da semana estimou-se 53,1 a percorrer com uma duração de 4 horas e 15 minutos para recolher 47,6 m³ de resíduos.

As distâncias a percorrer e tempos dos circuitos de quinta e sábado diminuiram face a segunda e quarta pois a quantidade a recolher não requer uma ida intermédia ao aterro para descarregar, sendo a capacidade da viatura suficiente para recolher a totalidade de resíduos em cada um dos dias.

Como forma de resumir os resultados obtidos neste cenário, apresenta-se uma tabela síntese de seguida, dividida por circuitos e com os dados referentes a cada um.

Tabela 5.1 - Resultados obtidos no cenário 1 para Algoz/Tunes, Messines e S. Marcos

	Circuito	Distância (km)	Tempo (h:min)	Nº contentores	Quantidade a recolher (m³)	Nº de idas a AS
Algoz/Tunes	2ª/5ª	84,3	04:35	163	48,5/36,4	1
	3ª/6ª	71,9	03:52	132	44,7/33,5	1
	4/Sáb.	104,3	04:09	143	37,9/28,4	1
Messines	2ª/5ª	82,5	04:05	140	22,7/14,6	1
	3ª/6ª	111,7	05:04	189	24,3/18,3	1
	4/Sáb.	90,8	03:58	131	18,5/16,5	1
S. Marcos	2ª/5ª	99,8	04:31	164	16,6/12,7	1
	3ª/6ª	135,2	05:08	162	12,8/10,4	1
	4ª	148,0	05:06	148	12,8	1
	Sáb.	160,5	05:33	160	11,9	1
Armação	2ª	127,6	05:47	178	65,1	2
	3ª	151,6	05:53	147	62,6	2
	4ª/6ª	77,2	04:43	178	42,5	1
	5ª/Sáb.	92,4	04:39	147	40,1	1
Silves	2ª	77,5	04:25	156	60,7	2
	3ª/6ª	55,7	04:02	168	52,8/43,4	1
	4ª	96,2	05:12	173	58,4	2
	5ª	58,3	03:56	156	38,5	1
	Sáb.	53,1	04:15	173	47,66	1

Os circuitos das três primeiras rotas apresentadas na tabela anterior têm em comum o facto de nenhum necessitar de se deslocar ao aterro a meio do turno, tendo o veículo capacidade suficiente para recolher a totalidade dos resíduos em cada circuito.

Quanto a Armação, os dois primeiros circuitos da semana, realizados à segunda e terça, têm necessidade de se deslocar ao aterro antes que estes sejam terminados, devido à

maior quantidade de resíduos a recolher, quando comparados com os outros dias. O mesmo acontece com os percursos de segunda e quarta-feira em Silves.

O número de contentores a recolher está equilibrado entre todos os circuitos, mas as quantidades de resíduos variam, destacando-se as rotas de Armação e Silves como sendo as que maiores quantidades recolhem. Por outro lado, os circuitos de S. Marcos são os que menores quantidades de resíduos têm para recolher, porém os que registam maiores distâncias percorridas e também tempos de duração, quando comparados com os circuitos das outras rotas que se realizam também numa só volta.

É de referir que, os circuitos de segunda e terça-feira de Armação e o de sábado de S. Marcos, estimaram tempos de execução acima do que tinha sido predefinido, pelo que foi preciso alterar o tempo total no VRP para se conseguir obter o circuito completo e respetivas distâncias percorridas e durações.

Contudo, analisando os percursos individualmente e com mais pormenor, é possível perceber que algumas soluções obtidas, ou parte delas, são facilmente questionáveis, no que toca à sequência de recolha de contentores e às manobras que o veículo teria de efetuar. Na figura seguinte demonstra-se um desses exemplos.

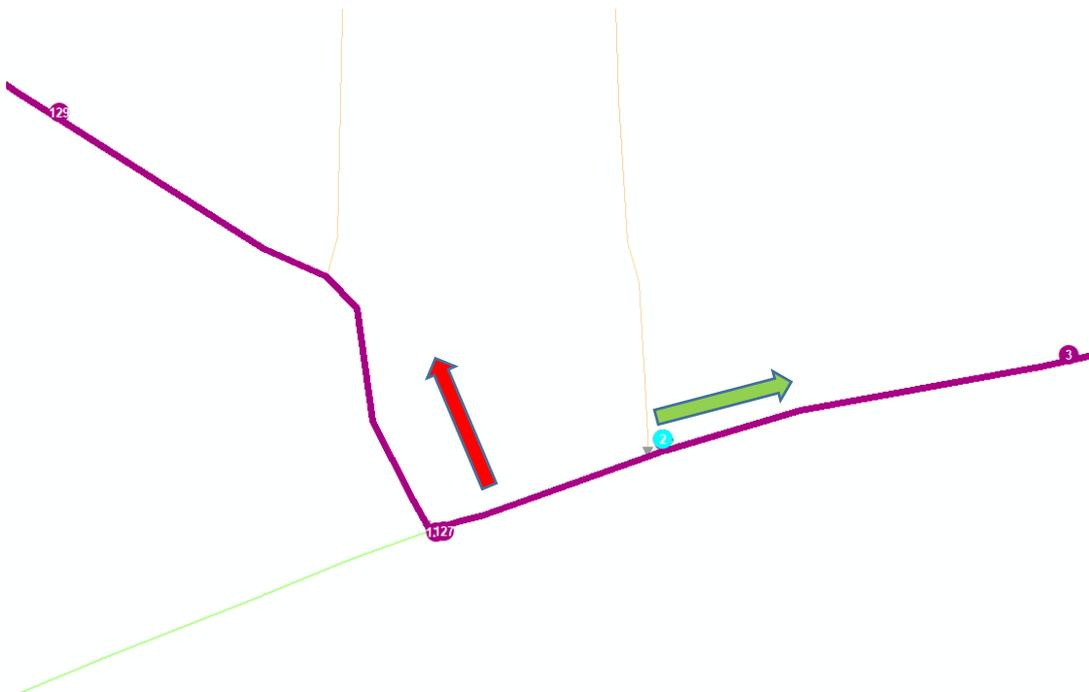


Figura 5.9 - Solução questionável no cenário 1

Na imagem apresentada de uma parte do circuito de quarta-feira de Algoz/Tunes, a título de exemplo, é possível ver que os primeiros contentores recolhidos, assinalados com os números 2 e 3, são recolhidos após o veículo ter passado por uma série de contentores no caminho para lá chegar (sentido da seta verde), sem recolhê-los, contentores esses sem lado específico de aproximação definido, e passíveis de serem recolhidos na primeira passagem. Como o VRP optou por não os recolher à primeira, foi feita outra passagem na mesma via mais tarde, em sentido inverso (seta vermelha), para os recolher, estando estes assinalados com os números 127, 128 e 129. Analisando o circuito como um todo, a segunda passagem nessa via julgou-se desnecessária pois os contentores poderiam ter sido recolhidos sequencialmente, sem necessidade de efetuar duas passagens.

O problema anteriormente mencionado verificou-se por diversas vezes, ao longo dos vários circuitos, o que pode indicar que os resultados são questionáveis, dando a ideia de ser possível otimizá-los de certa forma.

Como forma de tentar solucionar este problema, e também para ter outros resultados como forma de comparação, os circuitos foram simulados novamente, num novo cenário, que é apresentado de seguida.

5.2 CENÁRIO 2

Este cenário teve como principal objetivo resolver o problema que alguns circuitos, ou parte deles, apresentaram na sequência como os contentores foram recolhidos no cenário 1, de forma a obterem-se melhores resultados, reduzindo a distância percorrida e tempo de duração dos percursos.

A otimização neste cenário baseou-se nos mesmos pressupostos que o cenário 1 relativamente às características para cada percurso: mesmo ponto de partida e chegada, o mesmo tempo de descarga em aterro, a mesma capacidade para o veículo de recolha e o mesmo tempo limite para execução de cada percurso.

O atributo que se fez variar foi o lado da aproximação do veículo a cada contentor, que no cenário base não tinha sido definido para a maioria dos locais, deixando o VRP

escolher qual o lado mais indicado. Esta nova atribuição baseou-se numa análise às vias que cada circuito teria de passar, de forma a perceber qual o sentido mais favorável para recolher cada contentor ou grupo de contentores.

Para a maioria dos contentores foi definido um lado de recolha, esquerda ou direita, que depende do sentido em que se queria que o veículo transitasse, de forma a minimizar o tempo e distância totais do circuito. Esta nova atribuição permite que, em estradas secundárias por exemplo, o veículo consiga ir recolhendo contentores de ambos os lados da via, não tendo então de voltar a passar por lá uma segunda vez, ao contrário do que se verificou com cenário 1. Na figura seguinte apresenta-se a nova solução, para o mesmo segmento de via que tinha servido de exemplo ao problema detetado no cenário 1.

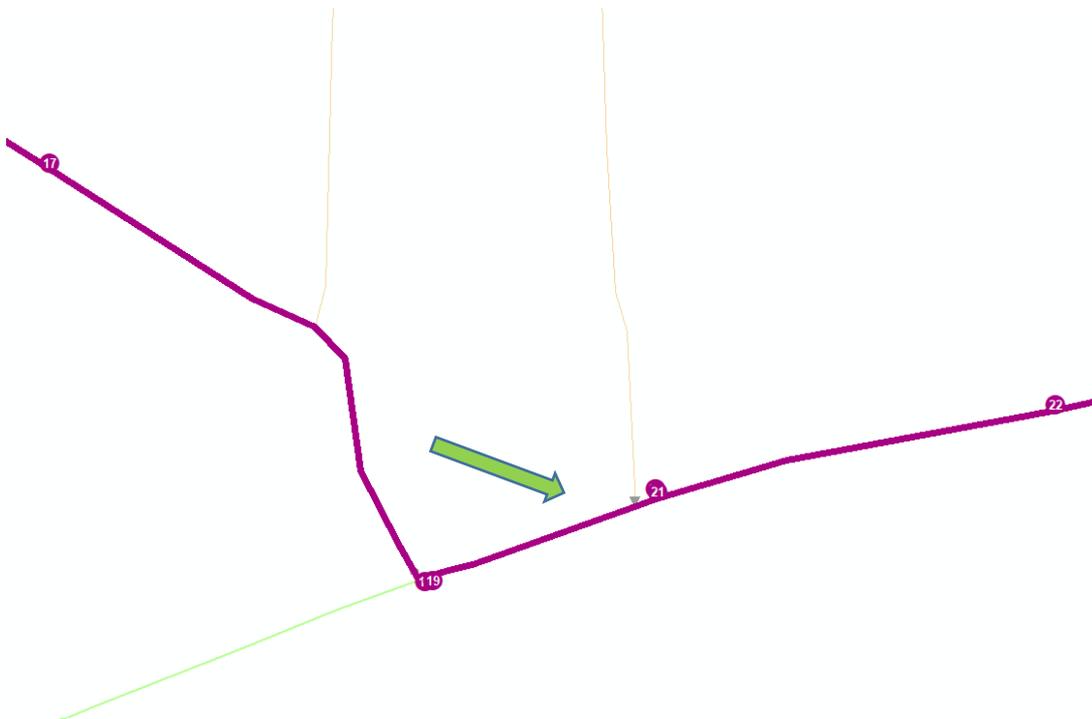


Figura 5.10 - Solução otimizada no cenário 2

É possível observar que a atribuição do lado exato em que o veículo vai encontrar cada contentor faz melhorar a solução obtida, constatando-se que todos os contentores neste segmento de estrada são recolhidos no mesmo sentido e numa só passagem, quer estejam no lado esquerdo ou no direito da faixa de rodagem.

Seguidamente, serão apresentados os resultados das simulações feitas neste novo cenário, que têm como base os mesmos grupos de contentores e também as mesmas quantidades recolhidas.

ALGOZ/TUNES

A figura que segue apresenta os novos resultados para os três circuitos da rota de Algoz/Tunes.



Figura 5.11 - Circuitos de Algoz/Tunes otimizados pelo cenário 2

Neste cenário 2, o percurso de segunda/quinta-feira percorre 85,6 km em 4 horas e 33 minutos, para recolher 48,5 m³ de resíduos à segunda e 36,4 m³ à quinta, distribuídos por 163 contentores.

No percurso de terça/segunda-feira são percorridos 62,1 km em 3 horas e 30 minutos, recolhendo à terça 44,7 m³ e à sexta 33,5 m³ de resíduos, em 132 contentores.

Para o circuito de quarta-feira e ao sábado, estimou-se uma distância percorrida de 80 km com uma duração de 3 horas e 41 minutos. À quarta-feira a quantidade a recolher é de 37,9 m³ de resíduos enquanto ao sábado é de 28,4 m³, num total de 143 contentores.

A próxima tabela apresenta a comparação dos resultados obtidos nos cenários 1 e 2 para os circuitos de Algoz/Tunes.

Tabela 5.2 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Algoz/Tunes

		Cenário 1		Cenário 2	
Circuito		Distância (km)	Tempo (h:min)	Distância (km)	Tempo (h:min)
Algoz/Tunes	2ª/5ª	84,3	04:35	85,6	04:33
	3ª/6ª	71,9	03:52	62,1	03:30
	4/Sáb.	104,3	04:09	80	03:41

Pela tabela conclui-se que todos os tempos foram otimizados em relação ao cenário base, mesmo no circuito de segunda/quinta que percorre mais 1 km, mas poupa 2 minutos em relação ao primeiro resultado. Os circuitos de terça/sexta e quarta/sábado também obtiveram melhorias tanto em tempo de duração como em distância percorrida, sendo que a melhoria mais significativa foi registada no circuito de quarta/sábado, diminuindo cerca de meia hora a sua duração e percorrendo menos 25 km aproximadamente.

MESSINES

Para a rota de Messines, os três novos circuitos simulados são os representados na figura seguinte.

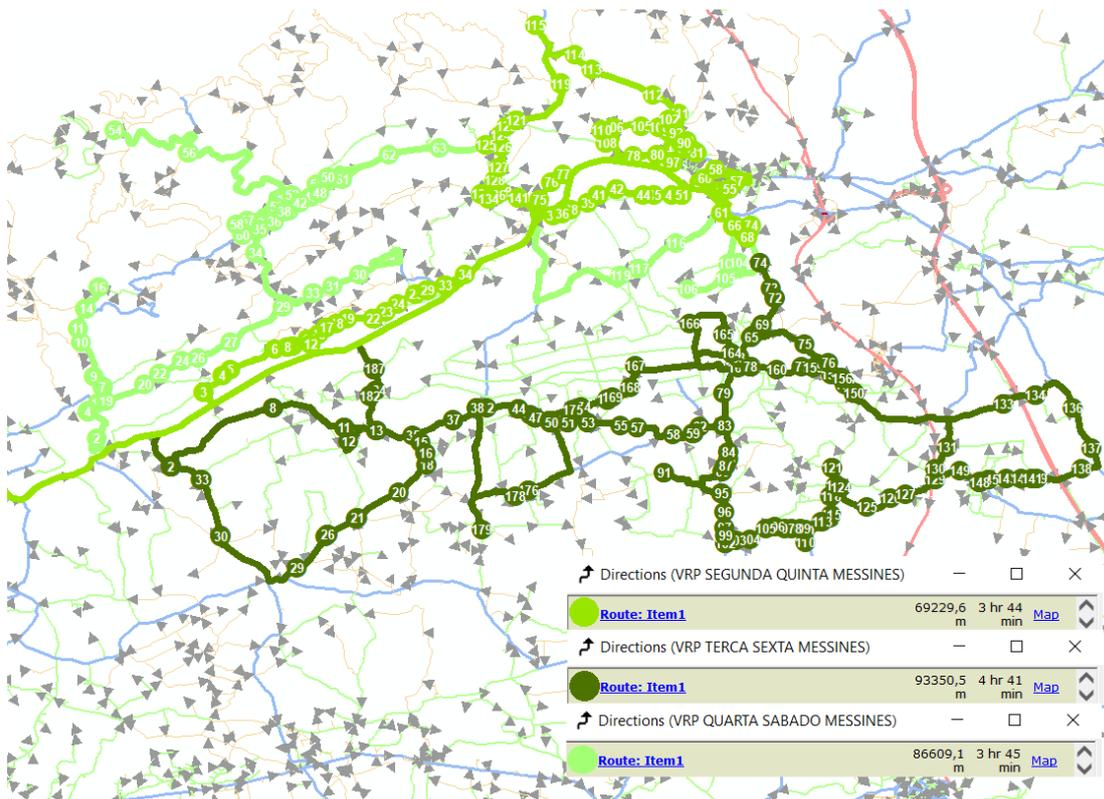


Figura 5.12 - Circuitos de Messines otimizados pelo cenário 2

Para o circuito de segunda/quarta-feira obteve-se uma nova distância percorrida de 69,2 km em 3 horas e 44 minutos. Este circuito tem para recolher 22,7 m³ de resíduos à segunda-feira enquanto à quinta-feira recolhe 14,6 m³, em 140 contentores.

No segundo circuito, realizado à terça e sexta-feira, a otimização estimou ter de percorrer 93,3 km em 4 horas e 41 minutos, tendo para recolher 189 contentores com cerca de 24,3 m³ e 18,3 m³ à terça e sexta-feira, respetivamente.

A simulação do último circuito de Messines resultou numa distância percorrida de 86,6 km em 3 horas e 45 minutos, destinado a recolher 18,5 m³ de resíduos à quarta e 16,5 m³ ao sábado, distribuídos por 131 contentores.

Na tabela seguinte pode ver-se a comparação de distâncias percorridas e tempos para os dois cenários.

Tabela 5.3 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Messines

	Circuito	Cenário 1		Cenário 2	
		Distância (km)	Tempo (h:min)	Distância (km)	Tempo (h:min)
Messines	2ª/5ª	82,5	04:05	69,2	03:44
	3ª/6ª	111,7	05:04	93,3	04:41
	4/Sáb.	90,8	03:58	86,6	03:45

Neste segundo cenário, os resultados para os três circuitos de Messines melhoraram todos, tanto em tempo de duração como em distância a percorrer. As melhores melhorias registaram-se nos dois primeiros circuitos, o primeiro percorrendo cerca de 10 km a menos e o segundo reduzindo a distância em perto de 20 km, sendo que ambos poupam cerca de 20 minutos.

S. MARCOS DA SERRA

De seguida são apresentados os circuitos otimizados de S. Marcos, através das condições deste cenário.

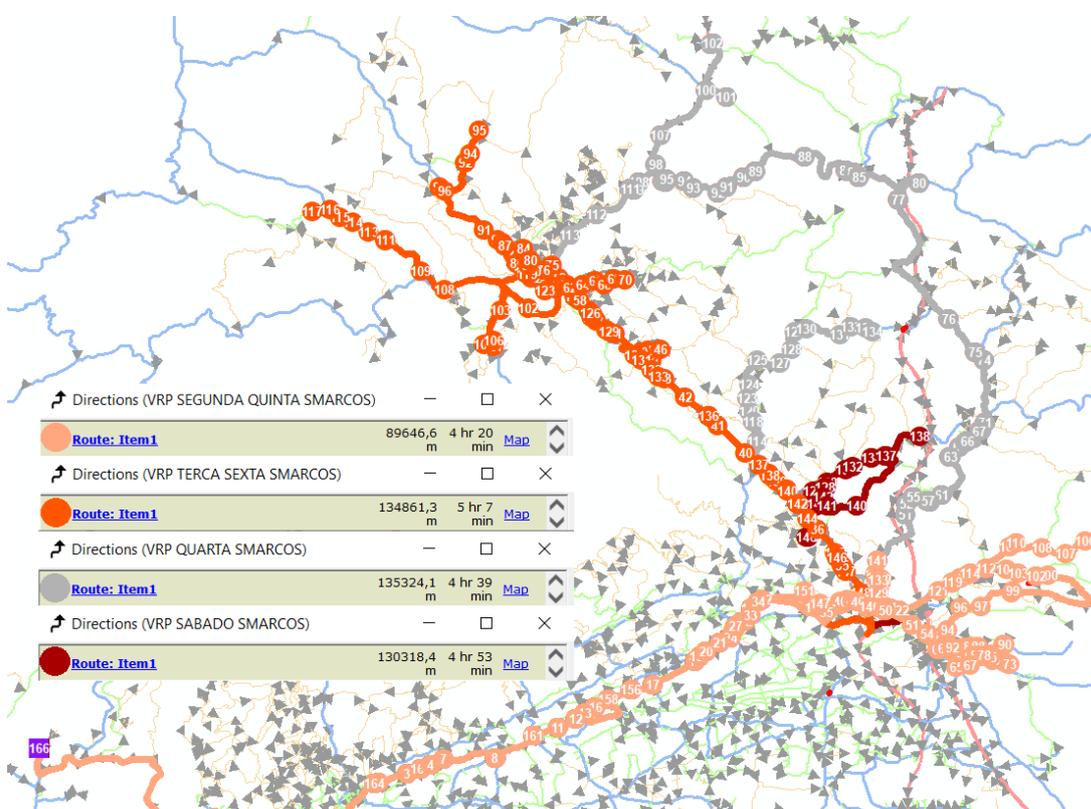


Figura 5.13 - Circuitos de S. Marcos otimizados pelo cenário 2

Para o novo circuito de segunda e quinta-feira calculou-se uma distância a percorrer de 89,6 km a demorar 4 horas e 20 minutos, com uma quantidade de resíduos a recolher à segunda-feira de 16,6 m³ e à quinta de 12,7 6 m³, distribuídos por 164 contentores.

A otimização para o circuito de terça e sexta-feira estimou uma distância a percorrer de 134,9 km em 5 horas e 7 minutos, circuito esse que inclui 162 contentores com 12,8 m³ de resíduos a recolher à terça-feira e 10,4 m³ a recolher à sexta.

Esta nova otimização do percurso de quarta-feira estimou 135,3 km em 4 horas e 39 minutos, para recolher 12,8 m³ de resíduos em 148 contentores. Já o percurso de sábado, que se sobrepõe em grande parte ao de quarta, estimou uma distância de 130,3 km para ser feita em 4 horas e 53 minutos, tendo uma quantidade para recolher de 11,9 m³ em 160 contentores.

A tabela resume os resultados obtidos nas duas simulações para os circuitos de S. Marcos.

Tabela 5.4 - Comparação dos cenários 1 e 2 para S. Marcos

		Cenário 1		Cenário 2	
		Distância (km)	Tempo (h:min)	Distância (km)	Tempo (h:min)
S. Marcos	2 ^a /5 ^a	99,8	04:31	89,6	04:20
	3 ^a /6 ^a	135,2	05:08	135,1	05:07
	4 ^a	148,0	05:06	135,3	04:39
	Sáb.	160,5	05:33	130,3	04:53

A diferença maior obtida nesta nova simulação aconteceu no percurso de sábado, tendo havido uma redução da distância a percorrer de cerca de 30 km e também no tempo previsto para execução dos circuitos, em mais de meia hora. Verifica-se que o este circuito, que ultrapassava o tempo máximo previsto em 18 minutos, nesta nova otimização já se encontra dentro do intervalo pretendido.

Nos circuitos de segunda/quinta e quarta também houve melhorias, apesar de menos significativas comparando com o que aconteceu no circuito de sábado, porém o circuito de terça/sexta manteve-se praticamente inalterado tanto em distância como em tempo, otimizando apenas a sequência com que os pontos de recolha eram recolhidos.

ARMAÇÃO DE PÊRA

Em relação a Armação de Pêra, como no cenário base se verificou que os circuitos de segunda e terça-feira necessitavam uma ida ao aterro a meio do turno devido à elevada quantidade a recolher, foi logo permitido que isso acontecesse antes de correr as novas simulações. Segue-se então a figura com os resultados para os dois primeiros circuitos da semana.

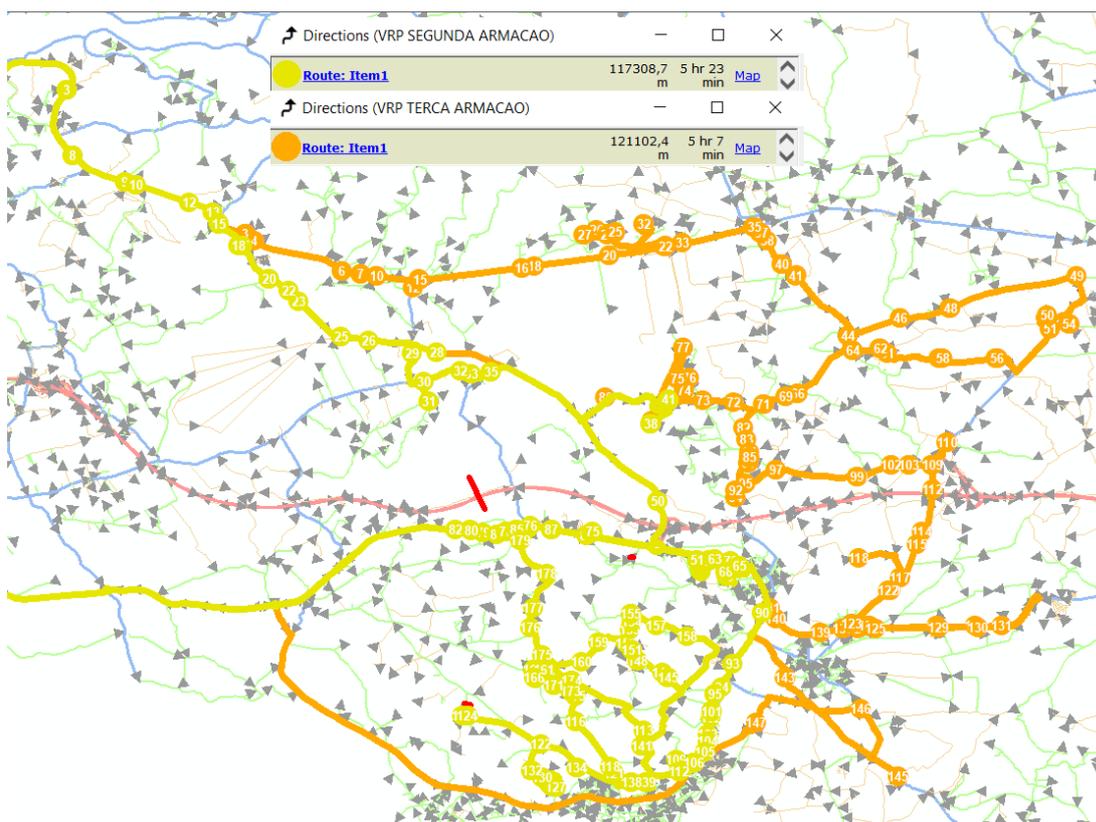


Figura 5.14 - Circuitos de segunda e terça em Armação otimizados pelo cenário 2

O circuito de segunda-feira para recolher 65,1 m³ de resíduos em 178 contentores percorreu 117,6 km em 5 horas e 23 minutos, ultrapassando em 8 minutos o tempo máximo previsto, que teve de ser redefinido. A ida intermédia ao aterro aconteceu depois de 82 contentores, com uma quantidade de 30 m³ de resíduos, ou seja, sensivelmente a meio do circuito.

O percurso de terça-feira, destinado a recolher 62,6 m³ de resíduos em 147 contentores, se fez em 121,1 km com uma duração de 5 horas e 7 minutos. O veículo deslocou-se ao

aterro depois de recolher 80 contentores com 37,9 m³ de resíduos, voltando depois para recolher o resto.

É de notar que apesar de percorrer uma distância maior, o circuito de terça estimou uma duração menor do que o de segunda.

Na próxima figura estão representadas as simulações para os circuitos de quarta/sexta e quinta/sábado.

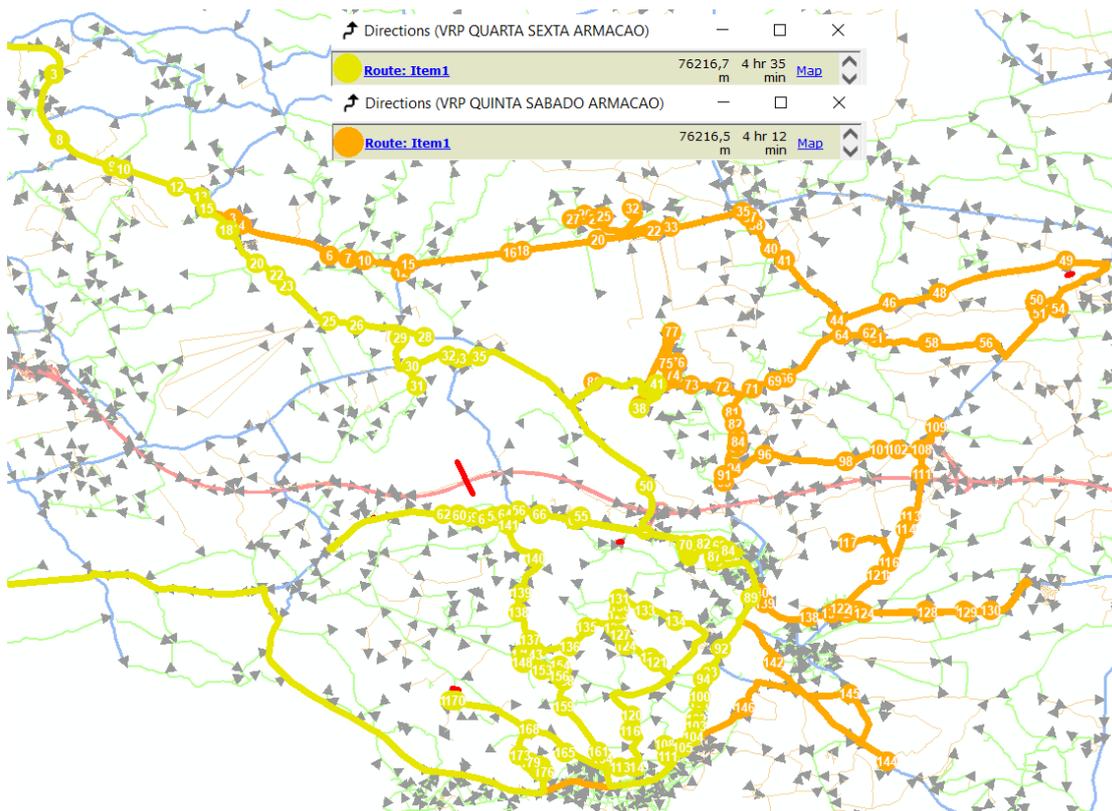


Figura 5.15 - Circuitos de quarta/sexta e quinta/sábado em Armação otimizados pelo cenário 2

O circuito otimizado que se realiza à quarta e sexta estimou uma distância a percorrer de 76,2 km em 4 horas e 35 minutos, com 42,5 m³ de resíduos para recolher em cada um dos dias.

Para quinta e sábado estimou-se um circuito com 76,2 km com uma duração de 4 horas e 12 minutos, destinado a recolher 40,1 m³ de resíduos em cada dia.

Estes dois circuitos reduziram significativamente a sua extensão face aos otimizados para segunda e terça, uma vez que estes conseguem recolher a totalidade dos contentores numa só volta, descarregando em aterro apenas uma vez.

A tabela seguinte compara os valores obtidos em Armação nos dois cenários simulados.

Tabela 5.5 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Armação

	Circuito	Cenário 1		Cenário 2	
		Distância (km)	Tempo (h:min)	Distância (km)	Tempo (h:min)
Armação	2ª	127,6	05:47	117,6	05:23
	3ª	151,6	05:53	121,1	05:07
	4ª/6ª	77,2	04:43	76,2	04:35
	5ª/Sáb.	92,4	04:39	76,2	04:12

Analisando o quadro, pode-se afirmar que aconteceram melhorias em todos os circuitos em distância e também em tempo, notando que as diferenças mais significativas foram registadas no circuito que se realiza à terça, à quinta e ao sábado. No cenário 1, os dois primeiros circuitos da semana ultrapassavam em mais de meia hora as 5 horas e 15 minutos previstas, contudo, neste cenário só o de segunda-feira excedeu esse tempo, por 8 minutos.

SILVES

Os resultados para os três circuitos da rota de Silves neste cenário são apresentados na figura que se segue, e tal como aconteceu nos circuitos de Armação, permitiu-se a deslocação do veículo ao aterro para descarregar, de forma a conseguir recolher a totalidade de resíduos, o que acontece à segunda e quarta-feira.

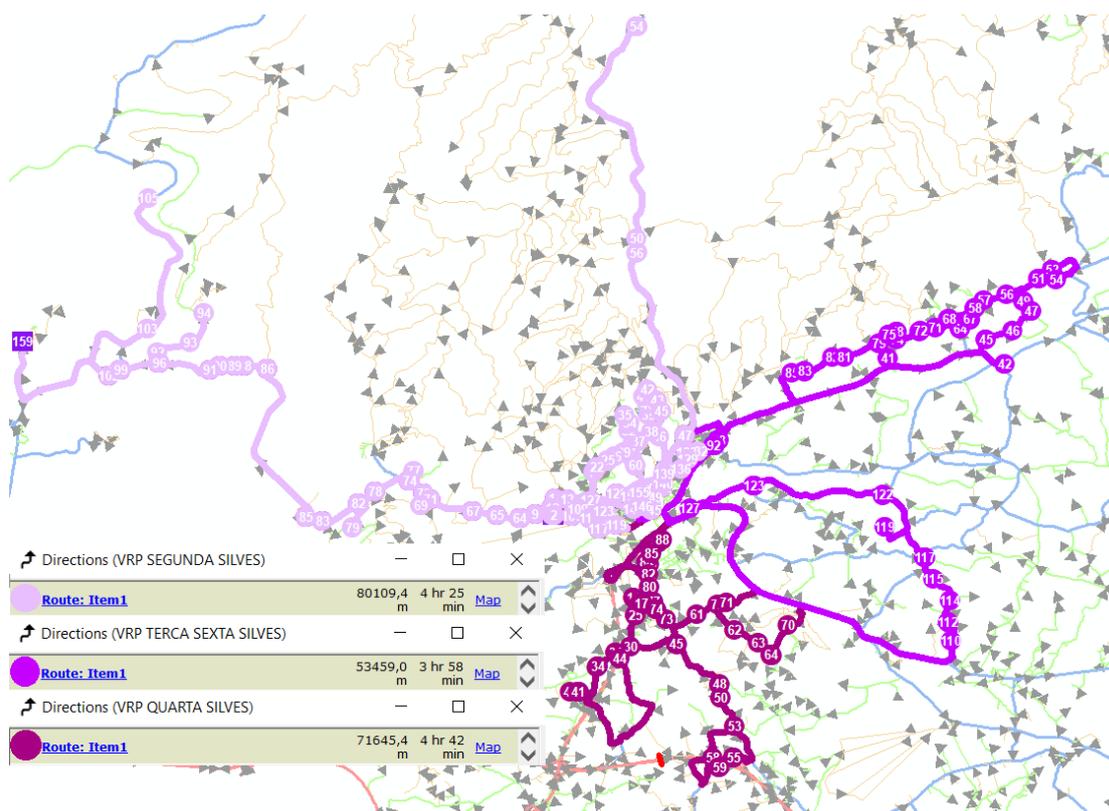


Figura 5.16 - Circuitos de segunda, terça e quarta-feira em Silves otimizados pelo cenário 2

Para segunda-feira estimou-se um percurso com 80,1 km em 4 horas e 25 minutos, para recolher um total de 60,7 m³ em 156 contentores. A deslocação intermédia ao aterro ocorre depois de recolher 105 contentores, descarregando 32,4 m³, voltando depois à cidade para completar o percurso.

Para terça-feira a distância a percorrer fixou-se nos 53,5 km com uma duração de 3 horas e 58 minutos, para recolher 52,8 m³ em 168 contentores, sem necessitar de paragem a meio para descarregar.

No circuito simulado para quarta-feira obteve-se uma distância de 71,6 km em 4 horas e 42 minutos. O circuito destina-se a recolher 173 contentores a armazenar 58,4 m³ de resíduos, sendo que a primeira ida ao aterro ocorre depois de recolher 49,7 m³ em 124 contentores.

A última simulação feita para este cenário foi para os circuitos de quinta, sexta e sábado, estando representada de seguida.

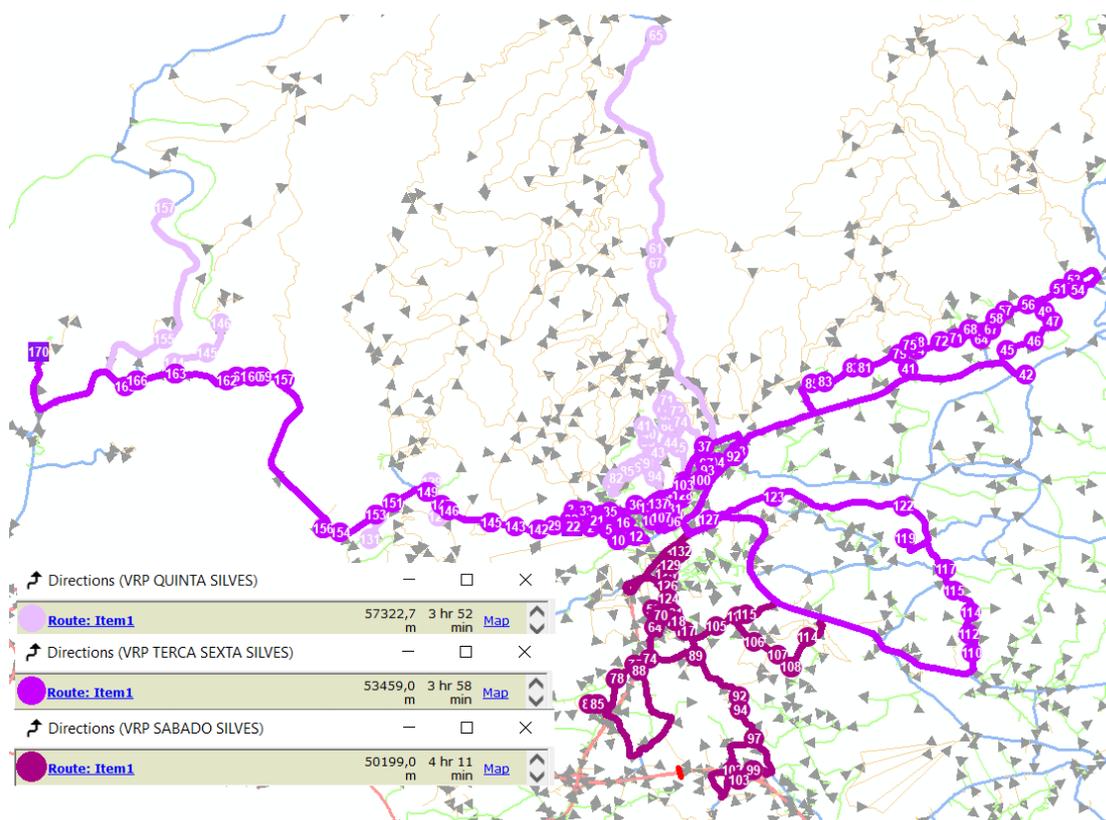


Figura 5.17 - Circuitos de quinta, sexta e sábado em Silves otimizados pelo cenário 2

O circuito de quinta estimou-se em 57,3 km e com uma duração de 3 horas e 52 minutos, para recolher 38,5 m³ de resíduos.

O circuito a percorrer sexta-feira mantém-se igual ao de terça, alterando apenas a quantidade de resíduos a recolher, fixando-se agora nos 43,4 m³.

A simulação do circuito de sábado estimou-se 50,1 km a percorrer com uma duração de 4 horas e 11 minutos para recolher 47,6 m³ de resíduos.

Como já foi mencionado no primeiro cenário, as distâncias a percorrer e tempos dos circuitos de quinta e sábado diminuiriam face a segunda e quarta pois a quantidade a recolher não requer uma ida intermédia ao aterro para descarregar, sendo a capacidade da viatura suficiente para recolher a totalidade de resíduos em cada um dos dias.

A tabela resume os resultados dos circuitos de Silves nos dois cenários modelados.

Tabela 5.6 - Comparação dos cenários 1 e 2 para Silves

		Cenário 1		Cenário 2	
Circuito		Distância (km)	Tempo (h:min)	Distância (km)	Tempo (h:min)
Silves	2ª	77,5	04:25	80,1	04:25
	3ª/6ª	55,7	04:02	53,8	03:58
	4ª	96,2	05:12	71,6	04:42
	5ª	58,3	03:56	57,3	03:52
	Sáb.	53,1	04:15	50,1	04:11

Todos os resultados obtidos neste cenário, para os circuitos de Silves, ficaram muito próximos dos que tinham sido registados no cenário anterior, à exceção do circuito de quarta-feira, que diminuiu mais de 20 km e meia hora face à primeira simulação. Pela primeira vez verificou-se um circuito que aumentou a distância a percorrer face ao primeiro cenário, como aconteceu no de segunda, contudo o tempo de duração manteve-se o mesmo.

É de salientar que, apesar dos resultados neste caso não indicarem uma otimização relevante, exceto na quarta-feira, a melhoria na sequência de recolha dos contentores e a necessidade de o veículo não andar a percorrer os mesmos locais mais que uma vez, torna os circuitos mais coerentes e fluídos.

Terminados todos os circuitos neste cenário, é possível afirmar que os resultados obtidos foram melhores do que os registados no cenário 1, visto que em maior parte dos circuitos a distância e o tempo de execução diminuíram claramente, e mesmo quando a diminuição foi pouco relevante, a melhoria na ordem de recolha dos contentores e na fluidez de execução dos circuitos compensam face ao que tinha sido simulado no cenário 1.

É possível comprovar a maior eficiência dos circuitos deste cenário pelo gráfico que se segue.

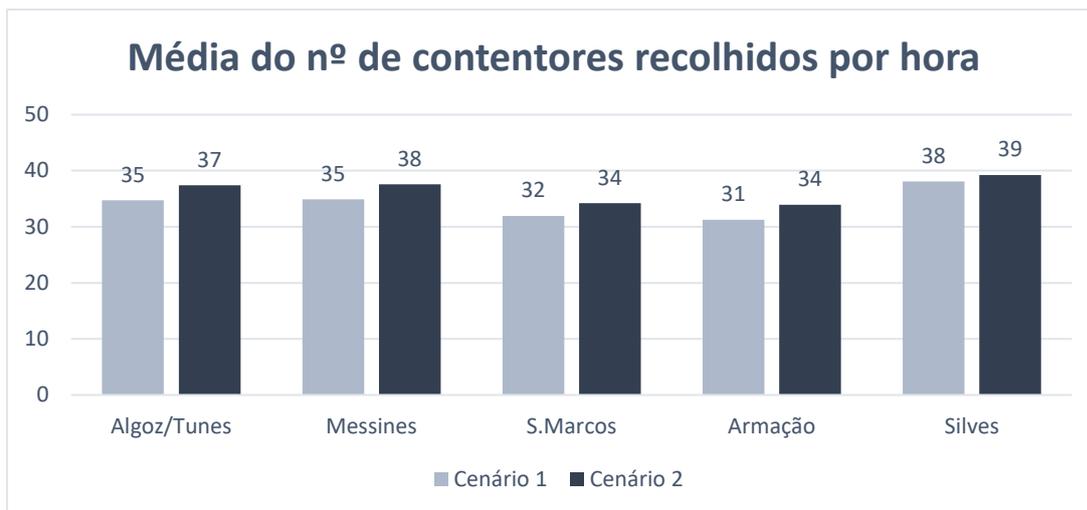


Figura 5.18 - Média no nº de contentores recolhidos por hora, para cada rota

Pelo gráfico pode-se, mais uma vez, constatar que o cenário 2 gerou circuitos mais eficientes do que o cenário 1, a média do nº de contentores recolhidos por hora, em cada rota, foi sempre superior no cenário 2, o que está diretamente ligado ao facto do nº de contentores a recolher num determinado circuito ser igual nos dois cenários, mas o tempo total de execução ter diminuído em praticamente todos os novos circuitos.

5.3 CENÁRIO 3

Uma vez que no cenário anterior os circuitos foram otimizados face à situação atual, que simulava recolher as quantidades apuradas no mês de agosto de 2018, as maiores registadas nos dados disponibilizados pela CMS, neste novo cenário decidiu simular-se um hipotético aumento das quantidades a recolher pelos circuitos, para perceber até que ponto a contentorização e os circuitos de recolha estão preparados segundo o que foi otimizado no cenário 2.

Foi calculado um aumento uniforme de 10%, em todas as rotas, fazendo assim aumentar as quantidades a recolher em todos os percursos simulados anteriormente. Primeiramente, estimaram-se as taxas de enchimento dos contentores registadas em cada rota, tendo em conta esse aumento.

Tabela 5.7 - Taxas de enchimento estimadas com aumento de 10% face ao cenário 2

	Taxa Enchimento atual	Taxa Enchimento com aumento de 10%
Algoz/Tunes	0,40	0,44
Messines	0,17	0,19
S. Marcos	0,25	0,28
Armação	0,46	0,51
Silves	0,67	0,74

Os valores das taxas de enchimento presentes na tabela são referentes à taxa de enchimento mais alta registada em cada circuito, que normalmente se regista em contentores presentes na primeira recolha da semana de cada circuito. A taxa de S. Marcos é uma exceção a isso porque é relativa a contentores que são recolhidos apenas uma vez por semana.

Segundo Campos (2014), um contentor deve ser recolhido quando o valor de taxa de enchimento atinge valores entre 0.7 e 0.75. Nos circuitos gerados pelo cenário 2, as taxas de enchimento foram sempre inferiores a 0.7, porém, na rota de Silves neste cenário onde se simula um aumento de 10%, esse intervalo de valores é atingido, registando 0.74 como taxa mais elevada.

De seguida apresenta-se a tabela com as quantidades de resíduos a recolher tendo em conta o aumento de 10% simulado neste cenário.

Tabela 5.8 – Quantidades de resíduos estimadas com aumento de 10% face ao cenário 2, a negrito as quantidades que precisam de ser recolhidas em duas voltas

	Quantidade atual a recolher (m ³)						Quantidade a recolher com aumento de 10% (m ³)					
	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	Sáb.	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	Sáb.
Algoz/Tunes	48,5	44,7	37,9	36,4	33,5	28,4	53,4	49,2	41,7	40,0	36,9	31,2
Messines	22,7	24,3	18,5	14,6	18,3	16,5	25,0	26,7	20,4	16,1	20,1	18,2
S. Marcos	16,6	12,8	12,8	12,7	10,4	11,9	18,3	14,1	14,1	14,0	11,4	13,1
Armação	65,1	62,6	42,5	40,8	42,5	40,8	71,6	68,9	46,8	44,9	46,8	44,9
Silves	60,7	52,8	58,4	38,5	43,4	47,7	66,8	58,1	64,2	42,4	47,7	52,4

Pela tabela percebe-se que o aumento nas quantidades a recolher fez com que no circuito de terça em Silves a quantidade a recolher excedesse os 55 m³ de capacidade do veículo, o que não acontecia antes do aumento. Este circuito necessita agora de descarregar a meio para conseguir recolher todos os contentores previstos, a par do que já acontecia nos circuitos de segunda e quarta em Silves e nos de segunda e terça em Armação, simulados pelo cenário 2.

Desta forma, foram simulados os percursos novamente para as novas quantidades de resíduos, contudo os circuitos que se realizavam apenas numa volta no cenário 2 e que agora continuaram a não ultrapassar o limite de capacidade do veículo, não sofreram quaisquer alterações nas distâncias e nos tempos. Por outro lado, demonstraram ser suscetíveis a sofrer alterações pelo aumento das quantidades a recolher, os circuitos dos dois primeiros dias que Armação e os três primeiros de Silves, que se executam em duas voltas.

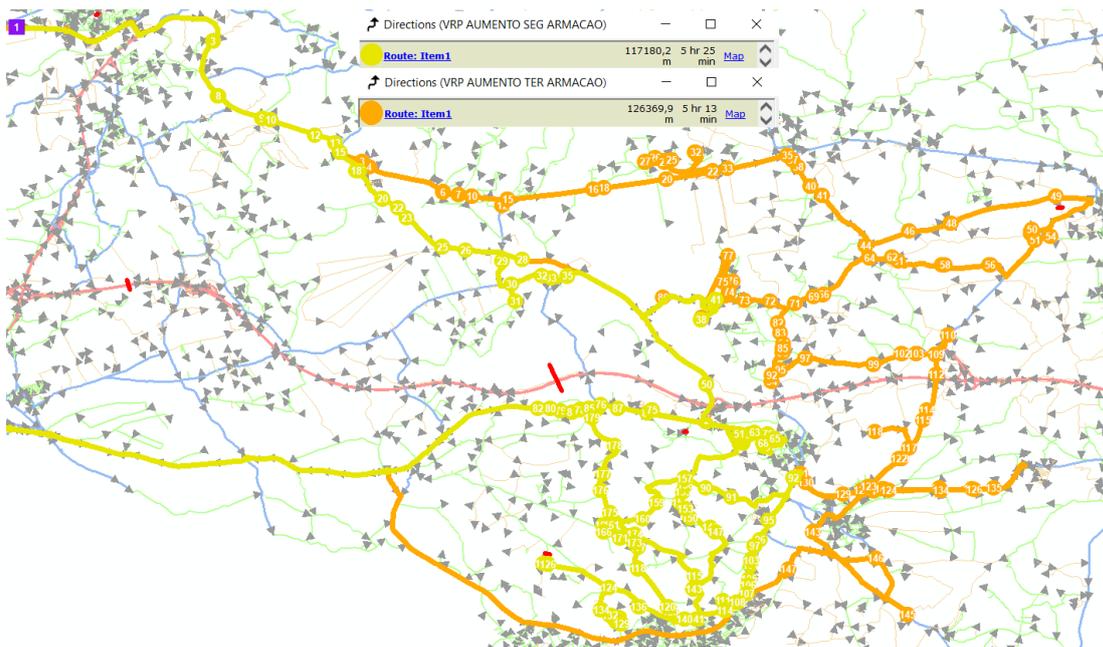


Figura 5.19 - Circuitos de segunda e terça de Armação otimizados pelo cenário 3

A figura anterior apresenta o resultado na nova simulação feita aos circuitos de segunda e terça-feira de Armação, concluiu-se então que o aumento das quantidades a recolher provocou ligeiras alterações na sequência de recolha de contentores na segunda volta de cada circuito, sendo que até à primeira ida ao aterro os percursos permaneceram

inalterados. Essas ligeiras alterações no percurso realizado provocaram as diferenças demonstradas na tabela seguinte.

Tabela 5.9 - Comparação dos circuitos de segunda e terça-feira de Armação nos cenários 2 e 3

		Armação	
		Cenário	2
Circuito 2ª feira	Distância (km)	117,6	117,2
	Tempo (h:min)	05:23	05:25
	Quantidade total (m ³)	65,1	71,6
	Quantidade 1ª volta (m ³)	30,0	33,1
	Quantidade 2ª volta (m ³)	35,1	38,5
Circuito 3ª feira	Distância (km)	121,1	126,4
	Tempo (h:min)	05:07	05:13
	Quantidade total (m ³)	62,6	68,9
	Quantidade 1ª volta (m ³)	37,9	41,7
	Quantidade 2ª volta (m ³)	24,7	27,2

O circuito de segunda, após o aumento de resíduos, manteve valores praticamente iguais no que toca à distância e duração, diminuindo apenas 1 de km e aumentando 2 minutos ao tempo total, variação que se deve à ligeira alteração no percurso.

Relativamente a terça-feira, a alteração foi maior, aumentando cerca de 5 km o percurso e demorando mais 6 minutos, resultado da alteração na sequência de recolha de contentores num segmento de via já perto do final do percurso.

Quanto a Silves, as simulações do cenário 3 apresentam-se a figura que se segue.

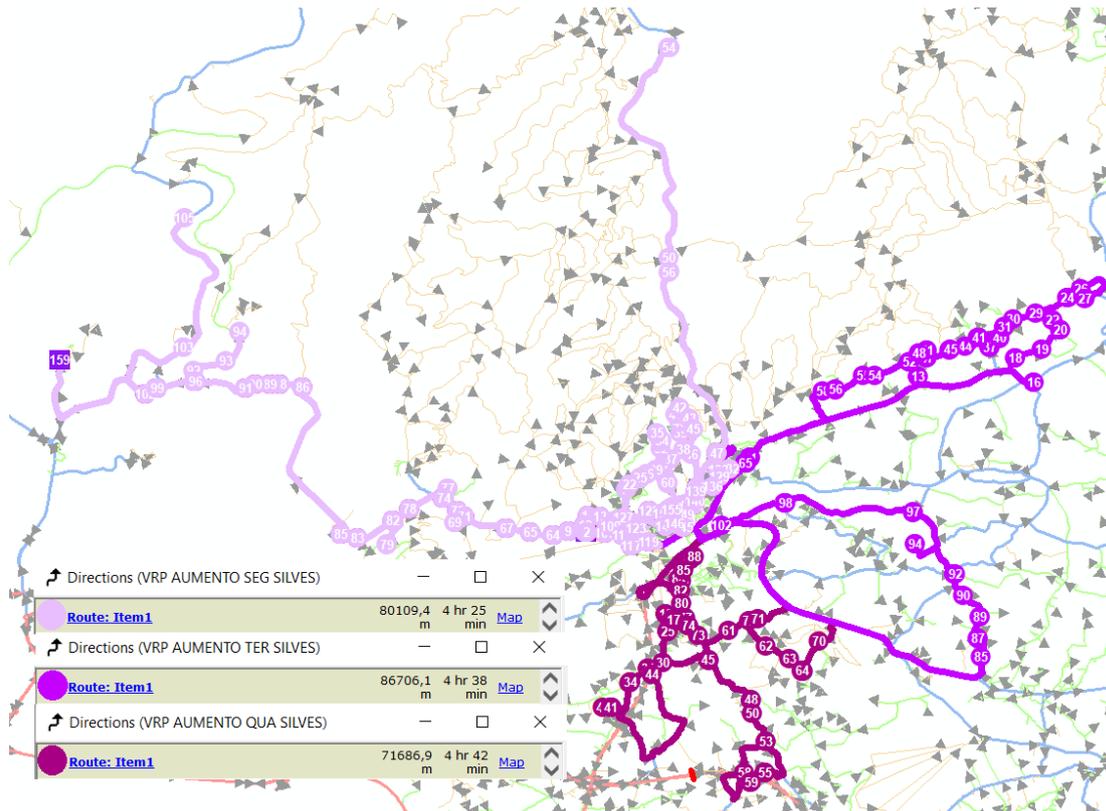


Figura 5.20 - Circuitos de segunda, terça e quarta de Silves otimizados pelo cenário 3

Os circuitos de segunda e quarta-feira, que no cenário 2 já necessitavam de duas voltas para recolher todos os contentores, permaneceram inalterados tanto em distância como em tempo, variando apenas a quantidade a transportar.

Por sua vez, o percurso de terça, que no cenário 2 era feito numa só volta, nesta simulação a quantidade a recolher ultrapassou a capacidade do veículo, tendo de descarregar duas vezes em aterro. Então, obteve-se o tempo para o novo circuito de 4 horas e 38 minutos, percorrendo 86,7 km, equilibrado com os restantes dois dias.

Tabela 5.10 - Comparação dos circuitos de segunda, terça e quarta de Silves nos cenários 2 e 3

		Silves	
		Cenário	
		2	3
Circuito 2ª feira	Distância (km)	80,1	80,1
	Tempo (h:min)	04:25	04:25
	Quantidade total (m ³)	60,7	66,8
	Quantidade 1ª volta (m ³)	32,4	46,5
	Quantidade 2ª volta (m ³)	28,3	20,3
Circuito 3ª feira	Distância (km)	53,8	86,7
	Tempo (h:min)	03:58	04:38
	Quantidade total (m ³)	52,8	58,1
	Quantidade 1ª volta (m ³)	52,8	54,9
	Quantidade 2ª volta (m ³)	-	3,2
Circuito 4ª feira	Distância (km)	71,6	71,6
	Tempo (h:min)	04:42	04:42
	Quantidade total (m ³)	58,4	64,2
	Quantidade 1ª volta (m ³)	49,7	54,1
	Quantidade 2ª volta (m ³)	8,7	10,1

Como já foi referido, é possível ver que os circuitos de segunda e quarta não se alteraram, aumentou apenas a quantidade a transportar em cada uma das voltas. Em relação ao circuito de terça, que passou, tal como os de segunda e quarta, a fazer duas voltas, registou distância e tempo parecidos relativamente aos outros. É de salientar que a pequena quantidade recolhida pelo circuito de terça na segunda volta se deve ao facto de o veículo conseguir completar quase na totalidade todo o percurso, excedendo a sua capacidade já na estrada a caminho do aterro, voltando para trás para recolher essa estrada apenas.

5.4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Dos três cenários apresentados neste trabalho, os dois primeiros consistem na obtenção dos vários circuitos necessários para recolher as diferentes zonas do concelho, baseados em diferentes abordagens. Já o terceiro cenário, modelou um aumento da quantidade a recolher de forma a perceber-se quais seriam as consequências nos circuitos obtidos anteriormente.

O primeiro cenário simulado caracterizou-se essencialmente por não ter sido definido um lado de aproximação da viatura em relação à maioria dos pontos de recolha, de forma a que o *Network Analyst* decidisse qual a melhor solução para cada situação encontrada. Foram obtidos resultados para todas as rotas, porém, como foi explicado no capítulo do cenário 1, os resultados obtidos nesse cenário foram algo questionáveis relativamente à sequência de recolha sugerida pelo programa. Por vezes, o programa sugeria duas ou mais passagens num determinado troço sem que aparentemente fosse necessário fazê-lo, dando a ideia que numa só passagem era possível recolher todos os contentores nesse respetivo troço.

De forma a tentar contornar o problema apresentado nas soluções obtidas no primeiro cenário, simulou-se um novo cenário, que em relação ao anterior fez variar o lado de aproximação do veículo atribuído a cada contentor, sendo definido para a maioria dos contentores um lado de recolha específico, quando no cenário 1 isso não tinha acontecido. O lado escolhido para cada ponto baseou-se numa análise feita às vias que cada circuito tinha de percorrer, de forma a perceber em que sentido era mais favorável o veículo deslocar-se, com vista a recolher os contentores desse local. Esta nova atribuição fez com que o veículo conseguisse recolher contentores localizados tanto à esquerda como à direita da via, de forma a evitar nova passagem pelo mesmo troço. Esta melhoria verificou-se essencialmente em estradas secundárias, porém nem sempre é possível recolher de ambos os lados da faixa de rodagem, como é o caso de estradas principais como o IC1, ou a N125.

Pode-se afirmar que todos os resultados obtidos no cenário 2 foram melhores do que os do cenário 1, dado que houve redução das distâncias a percorrer e dos tempos de duração na maioria dos circuitos, e nos circuitos em que as melhorias relativamente à distância e duração foram pouco significativas ou até mesmo nulas, a melhoria na sequência de recolha e a maior fluidez dos circuitos fazem com que os circuitos sejam considerados otimizados face ao primeiro cenário.

De seguida comentam-se os melhores resultados obtidos, relativos ao cenário 2, para as diferentes rotas a efetuar no concelho.

Nas rotas de Algoz/Tunes e de Messines, foram simulados 3 circuitos para cada, que se realizam duas vezes por semana. Em Algoz/Tunes o circuito que se realiza à segunda/quinta-feira foi o que apresentou maior duração, sendo também o que mais contentores tem para recolher face aos outros dois, enquanto em Messines o mesmo acontece no percurso de terça/sexta-feira. Estes dois circuitos apresentaram durações um pouco superiores às 4h30 com distâncias a percorrer de cerca de 90km. Os circuitos de terça/sexta e quarta/sábado em Algoz/Tunes foram estimados à volta de 3h30, com distâncias a percorrer de 62 e 80 km, respetivamente. Quanto a Messines, para os circuitos de segunda/quinta e quarta/sábado estimaram-se durações de 3h45, com distâncias a percorrer de 69 e 87 km, respetivamente.

Para a rota de S. Marcos, foram simulados também três circuitos destinados a fazer duas recolhas semanais cada. Dos circuitos obtidos, o que se realiza à segunda/quinta-feira apresenta-se como o menos extenso, percorrendo perto de 90 km em 4h20. Por sua vez, o de terça/sexta-feira apresenta a maior duração desta rota, demorando 5h07 para percorrer pouco mais de 130km. O circuito de quarta/sábado tem a particularidade de sofrer ligeiras alterações nos aglomerados a percorrer de um dia para o outro, contudo grande parte do circuito mantém-se igual nos dois dias. Posto isto, foi feita uma simulação para quarta e outra para sábado. Para quarta obteve-se um circuito estimado em 4h40 para percorrer 135 km enquanto para sábado uma duração de 4h53 num total de 130 km.

Na rota de Armação, existem apenas dois circuitos destinados a realizar três recolhas por semana cada, um para segunda/quarta/sexta-feira e outro para terça/quinta/sábado. Na otimização dos circuitos de segunda e terça-feira percebeu-se que nestes dois dias a quantidade a recolher ultrapassa a capacidade do veículo, o que ainda não tinha acontecido nas rotas anteriores. Face a essa particularidade, estes dois dias foram simulados à parte dos restantes dias. Para segunda obteve-se um circuito com uma duração de 5h23 e 118 km para percorrer, enquanto para terça estimou-se um circuito com 5h07 de duração e 121 km de distância. Nestes dois dias é necessária uma ida ao aterro intermédia para descarregar, completando o restante circuito na segunda volta. Por sua vez, o percurso estimado para quarta/sexta-feira necessitou

apenas numa volta, com duração de 4h35 para percorrer 76 km, tal como o percurso de quinta/sábado que se estimou durar 4h12 para percorrer também 76 km.

Para a rota de Silves, estipularam-se três circuitos com duas recolhas semanais cada. Os circuitos realizados à segunda e à quarta-feira apresentaram quantidades a recolher superiores à capacidade do veículo, pelo que tiveram de ser realizados em duas voltas, tal como já tinha acontecido em Armação. Para segunda estimou-se um circuito de 80 km para ser realizado em 4h25, necessitando de duas voltas para recolher a totalidade dos pontos. Já para quarta, a simulação resultou um circuito de 72 km com duração de 4h42, descarregando também duas vezes em aterro. Em relação aos circuitos que se realizam numa só volta, o de terça/sexta-feira apresentou uma distância de 54 km para ser feito em 3h58. O circuito de quinta-feira, destinado a recolher os mesmos contentores de segunda, porém sem precisar de realizar duas voltas, foi estimado em 57 km demorando 3h52, enquanto para o de sábado, que recolhe os mesmos contentores de quarta, obteve-se uma distância a percorrer de 50 km em 4h11.

Em relação às quantidades a recolher em cada rota, como foi perceptível nos resultados obtidos, as rotas que apresentaram maiores valores por circuito foram as de Armação e de Silves, sendo mesmo preciso realizar duas voltas em dois dos dias de cada rota, para recolher a totalidade dos contentores. As vezes em que a capacidade do veículo demonstrou não ser suficiente, coincidiram com a primeira recolha semanal de cada circuito, que é quando a periodicidade entre duas recolhas é maior, face à não execução de recolhas ao domingo.

Por outro lado, as rotas que registam menor quantidade de resíduos a recolher são as de Messines e S. Marcos, dando até ideia que a recolha nesses circuitos pudesse ser feita com uma viatura de menor dimensão ou que a recolha fosse feita com menor periodicidade. Não é possível afirmar que estas alterações eram aplicáveis em situação real, pois haverá locais em que a produção é mais elevada do que outros dentro de um único circuito, aspeto que foi desprezado devido ao uso de uma taxa de enchimento uniforme para todos os contentores de um determinado circuito, taxa que variava apenas consoante a periodicidade de recolha de cada contentor.

Por fim, no cenário 3 simulou-se um aumento hipotético de 10% nas quantidades a recolher pelos circuitos, para perceber até que ponto surgiriam alterações nos circuitos dimensionados pelo cenário 2. As simulações feitas neste cenário não provocaram alterações nos circuitos que se realizavam apenas numa volta no cenário 2 e que agora continuaram a não ultrapassar o limite de capacidade do veículo, sendo a diferença apenas a maior quantidade a recolher em cada um. Por outro lado, os circuitos de segunda e terça-feira de Armação, que se realizavam já em duas voltas, sofreram ligeiras alterações na sequência de recolha de contentores, o que não gerou alterações significativas nas distâncias e tempos de duração. Em Silves, para o circuito de terça-feira que no cenário anterior se realizava apenas numa volta, o aumento da quantidade a recolher fez com que fosse necessário descarregar duas vezes em aterro, aumentando a distância a percorrer em cerca de 30 km e o tempo em 40 minutos. Ainda em Silves, os circuitos feitos à segunda e à quarta, registaram diferenças apenas na quantidade que cada uma das voltas recolhe, mantendo as distâncias e durações.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram modelados os vários circuitos necessários à recolha de resíduos indiferenciados nos contentores de superfície do concelho, com o intuito de obter percursos otimizados, que reduzam os custos associados ao serviço de recolha da CMS.

Nos circuitos que foram obtidos neste trabalho, é possível saber para cada um deles a distância a percorrer, a duração, o número de contentores abrangidos, a respetiva sequência de recolha e também a quantidade de resíduos a recolher. Por sua vez, para as rotas que são executadas atualmente, apenas foi possível saber quais os contentores/grupos de contentores a recolher ou os locais a visitar em cada percurso, também são conhecidas por alto as periodicidades de recolha, e foi nestes dados disponibilizados pela CMS que se basearam os circuitos que foram obtidos neste estudo.

Contudo, devido à falta de dados pormenorizados relativos aos atuais circuitos de recolha, não é possível comparar a eficiência dos circuitos obtidos na otimização relativamente aos que se executam atualmente na área de estudo. O desconhecimento dos percursos exatos realizados atualmente e dos dados relativos a cada um, faz com que não seja possível afirmar que os circuitos modelados sejam efetivamente melhores, algo que teria de ser verificado no terreno e com recetividade das equipas de recolha às sugestões apresentadas. Uma hipótese de obter esses dados referentes aos circuitos atuais era realizar trabalho de campo, acompanhando as equipas de recolha em cada circuito e anotando as particularidades de cada um deles, contudo não foi possível realizar esse trabalho durante o tempo previsto para a dissertação, ficando o apuramento desses dados proposto para um trabalho futuro.

Um dos aspetos salientados pela CMS é a possibilidade de existirem alterações no percurso realizado em determinado circuito de um dia para outro. O percurso exato a realizar em determinado dia fica um pouco ao critério da equipa de recolha, devido ao conhecimento que têm da área de estudo e das particularidades de cada rota, funcionando este aspeto praticamente como forma de otimização própria.

Pode-se então concluir, que na gestão e recolha de resíduos, é necessário fazer uma perceção holística, que englobe as inúmeras particularidades destes sistemas, como a

sazonalidade que afeta alguns locais do concelho ou a diferença nas quantidades produzidas em meio urbano e em meio rural, por exemplo. Essa percepção permitirá implementar sistemas mais eficientes e perceber se os circuitos otimizados neste trabalho são de facto benéficos face ao cenário atual no concelho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Algar (2018). *Caracterização física de resíduos urbanos do sistema multimunicipal do Algarve (2017) – Relatório Final*. Obtido de: <https://www.algar.com.pt/media/13169/caracteriza%C3%A7%C3%A3o-fisica-de-residuos-2017.pdf> – Acesso a 9 de Julho de 2020.
- Afonso, M. (2012). *Otimização de rotas na recolha de resíduos urbanos: estudo de um caso real*. Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Decisão Económica e Empresarial; ISEG-UTL, Lisboa.
- Baptista, S., Oliveira, R., & Zúquete, E. (2002). A period vehicle routing case study, *European Journal of Operational Research*, 139, 220–229.
- BBBike.org (2020). *BBBike extracts OpenStreetMap*. Obtido de: <https://extract.bbbike.org/> - Acesso a 16 de Junho de 2020.
- Beijoco, A. (2011). *Optimização de um Sistema de Recolha e Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Engenharia Mecânica; IST-UTL, Lisboa.
- Barba, P. (2013). *Proposta de aplicação de métodos de pesquisa operacional em uma micro-empresa do setor comercial do ramo alimentício*. Dissertação para obtenção do título de Engenheiro de Produção e Sistemas; UDESC, Brasil.
- Beltrami, E., & Bodin, L. (1974). Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, 4(1), 65-94.
- Bronson, R., & Naadimuthu, G. (2001). *Investigação Operacional (2ª Edição)*. McGRAW-HILL de Portugal, Amadora.
- Campos, M. (2014). *Otimização da recolha de resíduos urbanos: Caso de estudo de Aveiro*. Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente; Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Carvalho, M. (2008). *Optimização de circuitos e indicadores de recolha de resíduos urbanos. Caso de estudo: Município de Almada*. Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, perfil Gestão e Sistemas Ambientais; FCT–UNL, Lisboa
- Chang, N., Lu, H., & Wei, Y. (1997). GIS technology for vehicle routing and scheduling in solid waste collection systems. *Journal of Environmental Engineering*, 123(9), 901-910.
- CMS. (2016). *Diagnóstico Social – Silves*. Câmara Municipal de Silves. Obtido de: https://cms.cm-silves.pt/upload_files/client_id_1/website_id_1/Acao_social/2017/Diagnostico%20Social%20Silves%202016.pdf – Acesso a 15 de Janeiro de 2019.
- Dantzig, G. B., Fulkerson, D. R., Johnson, S. M., & Cook, W. (1954). Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(4), 393-410.

FFMS. (2020). *PORDATA - Resíduos*. Fundação Francisco Manuel dos Santos. Obtido de: <https://www.pordata.pt/Subtema/Municipios/Res%c3%adduos-197> – Acesso a 29 de Setembro de 2020.

Eiselt, H. A., Gendreau, M., & Laporte, G. (1995). Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem. *Operations Research*, 43(3), 399-414.

Golden, B., & Wong, R. (1981). Capacitated Arc Routing Problems. *Networks* 11, 305-315.

Google (2020). *Silves* – *Google Maps*. Obtido de: <https://www.google.pt/maps/place/Silves/@37.2134745,-8.441399,12.78z/data=!4m5!3m4!1s0xd1ad8e07106937b:0x500ebbde490b670!8m2!3d37.1889976!4d-8.4412051> – Acesso a 30 de Setembro de 2020.

Gribovskaia, I., Halskau, Ø., & Laporte, G. (2007). The Bridges of Königsberg - A Historical Perspective. *Networks* 49, 199–203.

Karadimas, N. V, Kolokathi, M., & Loumos, V. (2007). Municipal Waste Collection of large items optimized with ArcGIS Network Analyst. In *Proceedings 21st European Conference on Modelling and Simulation*. Praga, República Checa, 4-6 Junho 2007.

Kulcar, T. (1996) Optimizing solid waste collection in Brussels. *European Journal of Operational Research*, 90(1), 71-77.

Levy, J., & Cabeças, A. J. (2006). *Resíduos Sólidos Urbanos - Princípios e Processos* (2ª Edição). AEPISA, Lisboa.

Martinho, M. G. M., & Gonçalves, M. G. P. (2000). *Gestão de Resíduos*. Universidade Aberta.

Matos, A. (2005). *Meta-heurísticas de optimização por colónias de formigas em problemas periódicos de estabelecimento de rotas*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Sistemas; IST-UTL, Lisboa

Mourão, M. (1999). *Optimização de Rotas na Recolha de Resíduos Urbanos*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Matemática Aplicada à Economia e Gestão; ISEG-UTL, Lisboa.

Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., & Braysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30, 223-232.

Oliveira, M. (2008). *Optimização de Circuitos de Recolha de Lixos Domésticos em Zonas Urbanas*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Ciências da Engenharia; FEUP-UP, Porto.

Oliveira, J., Mendes, B., & Lapa, N. (2009). *Resíduos – Gestão, Tratamento e a sua Problemática em Portugal*. Lidel, Lisboa.

Piedade, M., & Aguiar, P. (2010). *Opções de Gestão de Resíduos Urbanos*. Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos, Lisboa.

Rhyner, C., Schwartz, L., Wenger, R., & Kohrell, M. (1995). *Waste management and resource recovery*. Lewis Publishers.

Sahoo, S., Kim, S., Kim, B., Kraas, B., & Jr, A. P. (2005). *Routing Optimization for Waste Management*, 35(1), 24–36.

Salgado, D. (2020). *Modelo para Otimização das Rotas de Recolha de Resíduos no Concelho de Santarém*. Relatório de estágio; Universidade de Lisboa, Lisboa.

Sanches, A. & Silva, D. (2009). *Aplicação Conjunta do Método de Dijkstra e Otimização Combinatória para Solução de Problema de Caixeiro Viajante*. SEGeT - Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Rio de Janeiro, Brasil.

Seo, S., Asce, M., Aramaki, T., Yongwoo, H. & Hanaki, K. (2004). Environmental Impact of Solid Waste Treatment Methods in Korea. *Journal of Environmental Engineering*, 130(1). 81-89.

Silva, A. (2009). *Otimização da recolha de resíduos urbanos*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente; Universidade de Aveiro, Aveiro.

Silva, J. (2015). *Modelo de simulação de circuitos de recolha de resíduos urbanos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica; Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Sotkon (2019). *Sotkon – Videos Gallery*. Obtido de: <https://sotkon.com/en/videos/> - Acesso a 15 de Agosto de 2020.

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

Visitar Portugal (2018). *Silves (Concelho)*. Obtido de: <https://www.visitarportugal.pt/distritos/d-faro/c-silves?t=informacoes> – Acesso a 30 de Dezembro de 2018.