

**A aplicação de heurísticas e SIG para o planeamento
comparado de rotas de recolha de RSU**

Fábio Miguel Pinto Victorino

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientadores: Prof. João Carlos da Cruz Lourenço
Prof. Viriato Sérgio de Almeida Semião

Júri

Presidente: Prof. José Rui de Matos Figueira
Orientador: Prof. João Carlos da Cruz Lourenço
Vogal: Prof^a. Cristina Marta Castilho Pereira Santos Gomes

Novembro de 2016

Agradecimentos

O meu primeiro agradecimento vai para a minha avó Suzete, por me ter criado de forma tão dedicada e preocupada, pelo apoio incondicional e por me ter proporcionado todas as condições necessárias para superar todos os desafios que tenho vindo a encontrar pelo caminho.

De seguida quero agradecer aos meus Orientadores, Professor Viriato Semião e Professor João Lourenço, pela disponibilidade que demonstraram e por todo o apoio que me deram durante esta longa jornada. Não posso deixar de agradecer também ao Gilberto Tavares e à Zdena Zsigraiova pela ajuda que me deram na primeira fase desta dissertação.

Quero também agradecer à minha futura esposa que me tem vindo a apoiar nesta última etapa e que me tem dado toda a força necessária para superar este desafio.

Por último, mas não menos importante, queria agradecer à minha tia, à minha mãe, ao meu pai e aos meus amigos mais próximos pelo reconforto e apoio incondicional nas alturas de maior pressão.

Abstract

Solid waste management is a complex multifunctional process, being the collection and transportation of urban solid waste (USW) the most expensive of its operations. Taking this into consideration, minimizing the costs of this operation is of utmost importance for companies operating in the waste management sector.

In Portugal, Amarsul is the company responsible for collecting recyclable USW in the district of Setúbal, including the recyclable glass waste in Barreiro. Amarsul's glass collection system includes 230 containers, distributed in five different circuits, one waste treatment plant, and two different types of collection vehicles. Being a complex system it is important to determine efficient collection routes that serve all the containers in each circuit, while minimizing separately the distance travelled and the time spent by both vehicles.

The scope of this dissertation is then to present and compare two approaches for solving Amarsul's vehicle routing problem (VRP) – a geographic information system (GIS) and a decision support system (DSS) – taking into consideration a pre-defined set of constraints (e.g. service times, maximum work shift times, etc.). The GIS used to solve the VRP was the ArcGIS, namely the Network Analyst extension which uses a tabu search meta-heuristic. The DSS *routePlanner* was developed specially for this case and had implemented the Clarke and Wright savings algorithm (1962) and the 2-Opt improvement heuristic (Flood, 1956). Both software tools were compared based on indicators developed in this work.

Keywords: urban solid waste management, vehicle routing problem, geographic information system, decision support system, constructive heuristics, improvement heuristics.

Resumo

A gestão de resíduos sólidos é um processo multifuncional complexo, sendo a recolha e transporte de resíduos sólidos urbanos (RSU) a operação mais dispendiosa deste processo. Tendo isto em conta, a minimização dos custos associados a esta operação é de extrema importância para as empresas que operam neste setor.

Em Portugal, a Amarsul é a empresa responsável pela recolha de RSU recicláveis no distrito de Setúbal, incluindo a recolha de vidro reciclável no Barreiro. O sistema de recolha e transporte de vidro da Amarsul engloba 230 contentores de ecoponto, distribuídos por cinco circuitos, uma estação de tratamento de resíduos, e dois veículos de recolha diferentes. Como tal, é importante determinar um conjunto de rotas onde sejam servidos todos os ecopontos de cada circuito, minimizando separadamente a distância percorrida e o tempo gasto pelos veículos.

O âmbito desta dissertação é, então, solucionar o *Vehicle Routing Problem* (problema VRP) da Amarsul através de duas abordagens diferentes – um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) –, tendo em conta um conjunto pré-definido de restrições associadas (e.g. tempos de serviço nos ecopontos, turnos máximos de operação, etc.). O SIG utilizado foi o *ArcGIS*, nomeadamente a extensão *Network Analyst* que usa a meta-heurística *tabu search*. O SAD *routePlanner* foi desenvolvido especificamente para este estudo de caso e implementa a heurística construtiva de Clarke e Wright (1962) e a heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956). Ambas as abordagens foram comparadas com base em indicadores desenvolvidos no âmbito nesta dissertação.

Palavras-chave: gestão de resíduos sólidos urbanos, problema VRP, sistema de informação geográfica, sistema de apoio à decisão, heurísticas construtivas, heurísticas melhorativas.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização.....	1
1.1.1	O panorama nacional na GRSU	2
1.2	Motivação	3
1.2.1	Impacto económico da energia.....	4
1.2.2	Consumo de energia em Portugal	5
1.3	Principais objetivos do trabalho	6
1.4	Organização do documento.....	6
2	Apresentação da Amarsul e do estudo de caso	8
2.1	A empresa Amarsul.....	8
2.2	Sistema de recolha e transporte de resíduos de vidro reciclável da Amarsul.....	9
2.2.1	Rede de contentores de ecoponto	9
2.2.2	Frota de veículos utilizada e custos operacionais específicos	10
2.2.3	Circuitos de recolha de vidro atualmente existentes	11
2.2.4	Definição dos ecopontos a incluir em cada circuito	13
3	Revisão da literatura.....	14
3.1	Conceitos e definições	14
3.1.1	A aplicabilidade da Investigação Operacional à Logística	14
3.1.2	O problema do planeamento de rotas de veículos	15
3.1.3	Variantes ao problema do planeamento de rotas de veículos	19
3.2	Métodos de resolução	20
3.2.1	Métodos de resolução exata.....	20
3.2.2	Métodos de resolução aproximada.....	21
3.2.3	Sistemas de Informação Geográfica – SIG	25
3.3	Resultados de investigação prévia relativamente à gestão de resíduos sólidos urbanos ...	27
3.3.1	Estudos feitos com recurso a métodos de resolução exata	27
3.3.2	Estudos feitos com recurso a métodos de resolução aproximada	29
3.3.3	Estudos feitos com recurso a SIG	33
3.3.4	Estudos feitos recorrendo a outro software comercial.....	35

3.4	Contribuições potenciais do trabalho	36
4	Resolução do problema VRP da Amarsul	38
4.1	Objetivos para a determinação de rotas.....	38
4.2	Abordagens de resolução.....	38
4.2.1	Sistema de Informação Geográfica <i>ArcGIS</i>	39
4.2.2	Sistema de Apoio à Decisão <i>routePlanner</i>	41
5	Resultados	50
5.1	Introdução.....	50
5.2	Representatividade dos circuitos da Amarsul.....	50
5.3	Metodologia de análise e comparação dos resultados	51
5.4	Resultados obtidos através do <i>ArcGIS</i>	53
5.4.1	Planeamento minimizando a variável tempo.....	54
5.4.2	Planeamento minimizando a variável distância.....	56
5.5	Resultados obtidos através do <i>routePlanner</i>	58
5.5.1	Planeamento minimizando a variável tempo.....	59
5.5.2	Planeamento minimizando a variável distância.....	60
5.6	Comparação dos resultados obtidos com as duas abordagens.....	61
5.6.1	Planeamento minimizando a variável tempo.....	61
5.6.2	Planeamento minimizando a variável distância.....	63
6	Conclusões e trabalho futuro	65
6.1	Conclusões	65
6.2	Trabalho futuro.....	67
	Referências	69

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Produção anual e destinos dos RSU em Portugal Continental (Fonte: INE, 2012 e cálculos do autor)	2
Tabela 2.1 – Características dos veículos de recolha de vidro da Amarsul (Fonte: Beijoco, 2011)	10
Tabela 2.2 – Custos operacionais específicos dos veículos de recolha de vidro reciclável (Fonte: Beijoco, 2011)	11
Tabela 2.3 – Caracterização dos circuitos de recolha de vidro da Amarsul (Fonte: Beijoco, 2011)	12
Tabela 3.1 – Denominação do problema VRP consoante a condição adicionada (Fonte: Makan et al., 2011).....	20
Tabela 5.1 – Resultados do planeamento por tempo utilizando as funcionalidades “New VRP” e “New Route” do ArcGIS e cálculo do indicador <i>MV</i>	55
Tabela 5.2 – Cálculo dos indicadores <i>VP</i> , <i>ES</i> e <i>DC</i> referentes ao planeamento por tempo utilizando a funcionalidade “New VRP” do ArcGIS.....	55
Tabela 5.3 – Resultados do planeamento por distância utilizando as funcionalidades “New VRP” e “New Route” do ArcGIS e cálculo dos indicadores <i>MV</i> e <i>VP</i>	57
Tabela 5.4 – Resultados do planeamento por tempo calculados pela heurística de Clarke e Wright (1962) (coluna C&W) e melhorados pela heurística 2-Opt (Flood, 1956) (coluna C&W + 2-Opt) e cálculo do indicador <i>MV</i>	59
Tabela 5.5 – Cálculo dos indicadores <i>VP</i> , <i>ES</i> e <i>DC</i> referentes ao planeamento por tempo para os resultados melhorados pela heurística 2-Opt (Flood, 1956).....	60
Tabela 5.6 – Resultados do planeamento por distância obtidos pela heurística de Clarke e Wright (1962) (coluna C&W) e melhorados pela heurística 2-Opt (Flood, 1956) (coluna C&W + 2-Opt) e cálculo dos indicadores <i>MV</i> e <i>VP</i>	60
Tabela 5.7 – Resultados do planeamento por tempo obtidos através da funcionalidade “New VRP” do ArcGIS e da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) do <i>routePlanner</i> e comparação das duas ferramentas através do cálculo do indicador <i>MV</i>	62
Tabela 5.8 – Comparação dos resultados do planeamento por tempo obtidos através da funcionalidade “New VRP” do ArcGIS e da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) do <i>routePlanner</i> através do cálculo dos indicadores <i>VP</i> , <i>ES</i> e <i>DC</i>	63
Tabela 5.9 – Resultados do planeamento por distância obtidos através da funcionalidade “New VRP” do ArcGIS e da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) do <i>routePlanner</i> e comparação das duas ferramentas através do cálculo dos indicadores <i>MV</i> e <i>VP</i>	64

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Distribuição geográfica dos ecopontos de recolha de vidro e localização da Amarsul (Fonte: Zsigraiova et al., 2013)	10
Figura 2.2 – Exemplo de duas rotas seguidas pelos veículos da Amarsul para um mesmo circuito (Fonte: Zsigraiova et al., 2013)	13
Figura 3.1 – Ilustração do princípio das poupanças (Fonte: Lysgaard, 1997)	23
Figura 3.2 – Rearranjo usando o 2-Opt: rota original à esquerda e rota resultante à direita (Fonte: Johnson e McGeoch, 1997)	24
Figura 3.3 – Dois possíveis rearranjos usando o 3-Opt: rota original à esquerda e rotas resultantes à direita (Fonte: Johnson e McGeoch, 1997)	24
Figura 3.4 – Exemplo do procedimento da heurística CROSS (Fonte: Taillard et al., 1997)	24
Figura 3.5 – Exemplo do procedimento da heurística 2-Opt* (Fonte: Taillard et al., 1997)	24
Figura 4.1 – Estrutura da base de dados de um circuito da Amarsul, que inclui as matrizes OD de distâncias e tempos e os volumes de enchimento de cada ecoponto	45
Figura 4.2 – Ecrã inicial do <i>routePlanner</i>	46
Figura 4.3 – Ecrã apresentado durante o cálculo das rotas de recolha	47
Figura 4.4 – Ecrã de apresentação das rotas de recolha usando apenas um veículo	48
Figura 4.5 – Ecrã de apresentação das rotas de recolha usando ambos os veículos	49
Figura 5.1 – Dispersão geográfica dos ecopontos dos circuitos A (esquerda), B (centro) e C (direita)	51
Figura 5.2 – Dispersão geográfica dos ecopontos dos circuitos D (esquerda) e E (direita)	51
Figura 5.3 – Rotas obtidas para o planeamento por tempo e para os circuitos A (em cima), D (em baixo, à esquerda) e E (em baixo, à direita) utilizando as funcionalidades “ <i>New VRP</i> ” e “ <i>New Route</i> ” do <i>ArcGIS</i>	56
Figura 5.4 – Rotas obtidas para o planeamento por distância e para os circuitos A (esquerda) e C (direita) utilizando as funcionalidades “ <i>New VRP</i> ” e “ <i>New Route</i> ” do <i>ArcGIS</i>	57
Figura 5.5 – Rotas obtidas para o planeamento por distância e para os circuitos D (esquerda) e E (direita) utilizando as funcionalidades “ <i>New VRP</i> ” e “ <i>New Route</i> ” do <i>ArcGIS</i>	58

Lista de Abreviaturas

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CVRP – *Capacitated VRP*

DC – Distribuição da Carga

ES – Ecopontos Servidos

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

GRSU – Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

INE – Instituto Nacional de Estatística

IO – Investigação Operacional

KPI – *Key Performance Indicators*

MAOTDR – Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional

MDVRP – *Multiple Depot VRP*

MFVRP – *Mixed Fleet VRP*

MOPTC – Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações

m-TSP – problema *m*-TSP

MV – Melhoria Verificada

PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

PVRP – *Periodic VRP*

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SAD – Sistema de Apoio à Decisão

SDVRP – *Split Delivery VRP*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TS – *Tabu Search*

TSP – problema do caixeiro viajante (em inglês, *Travelling Salesman Problem* – TSP)

VBA – *Visual Basic for Applications*

VNS – *Variable Neighbourhood Search*

VP – Volume Preenchido

VRP – problema do planeamento de rotas de veículos (em inglês, *Vehicle Routing Problem*)

VRPPD – *VRP with simultaneous Pick-Up and Delivering*

VRPTW – *VRP with Time Windows*

UE – União Europeia

1 Introdução

1.1 Contextualização

A gestão de resíduos sólidos é um processo complexo, multifuncional e multidisciplinar, já que envolve atividades como a geração dos resíduos (incluindo redução na fonte), o manuseamento e armazenagem, a recolha, a transferência e transporte, bem como o processamento e deposição dos resíduos sólidos. Todas estas atividades são levadas a cabo tendo em conta as diretrizes locais, não só em termos legais, mas também em termos sociais e ambientais. A incorporação das referidas diretrizes nas atividades de gestão dos resíduos sólidos objetiva a proteção da saúde pública, considerando ainda fatores económicos e estéticos (Tchobanoglous, 2003).

Define-se como resíduo “*qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer (...)*” (MAOTDR, 2006, p. 6530). São considerados resíduos urbanos “*os resíduos provenientes de habitações bem como outros resíduos que, pela sua natureza ou composição, sejam semelhantes aos resíduos provenientes de habitações*” (MAOTDR, 2006, p. 6530). As operações de gestão de resíduos dizem respeito “*a toda e qualquer operação de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, bem como às operações de descontaminação de solos e à monitorização dos locais de deposição após o encerramento das respetivas instalações*” (MAOTDR, 2006, pp. 6528-6529).

As políticas de gestão de resíduos sólidos urbanos (GRSU) em Portugal têm sido fortemente influenciadas pelas diretivas europeias em vigor sobre a temática. Para além de funcionarem como paradigma, os documentos incentivaram o desenvolvimento de legislação portuguesa relativa a esta temática. No que respeita ao destino final dos resíduos, enquanto os países nórdicos utilizavam a incineração e a reciclagem como soluções preferenciais, o Sul da Europa optava pela deposição em aterros. Visando a uniformização das práticas levadas a cabo pelos diversos países constituintes da União Europeia (UE), foi criada legislação comunitária específica que é analisada no trabalho de Magrinho *et al.* (2006). No trabalho de Bing *et al.* (2015) pode ser encontrada uma comparação entre as práticas de GRSU de vários países da UE (entre outros, Alemanha, Espanha, Holanda, Portugal, Reino Unido e Suécia), onde são identificadas as principais características associadas a cada país, quer do ponto de vista da gestão dos resíduos propriamente dita, quer do ponto de vista logístico.

A organização e estruturação do setor dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em Portugal Continental foi implementada e monitorizada com base no Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) (MA, 1997). Não obstante os sistemas de gestão de RSU e as entidades gestoras dos diversos fluxos de resíduos estarem, na maior parte dos casos, a funcionar em pleno, ou em fase de constituição e/ou operacionalização, a revisão do documento mencionado tornou-se necessária por forma a considerar o quadro comunitário e nacional, bem como protocolos internacionais. Surgiu assim o PERSU II (MAOTDR, 2007), incluindo medidas que permitem o aumento da eficiência e eficácia das práticas de gestão de RSU, constituindo o novo referencial para os agentes do setor, para o horizonte 2007-2016. Um dos princípios orientadores do PERSU II foi a importância de uma política de RSU ajustada aos compromissos de redução das emissões de gases com efeito de estufa, assumidos no âmbito do Protocolo de Quioto.

Da aplicação do PERSU resultaram vários benefícios, não só a nível ambiental, mas também em termos económicos, sendo o balanço global claramente positivo. Na componente ambiental a erradicação total das lixeiras a céu aberto, bem como o cumprimento dos objetivos globais de reciclagem de resíduos de embalagem, consolidaram o impacto positivo deste plano estratégico. Na componente económica destacam-se a criação de um novo mercado setorial, que emprega atualmente milhares de pessoas, e a promoção da otimização de circuitos de recolha e transporte para os RSU e suas frações valorizáveis (MAOTDR, 2007).

1.1.1 O panorama nacional na GRSU

Em termos gerais, a quantidade de RSU gerados numa sociedade é bastante variável, e a sua acumulação depende de fatores como o número de habitantes que partilham um contentor, o PIB *per capita*, o estilo de vida, a altura do ano, entre outros (Nuortio *et al.*, 2006). Em Portugal Continental, a produção de RSU atingiu 4,5 milhões de toneladas em 2005, o que equivale a cerca de 1,24 kg por habitante e por dia (MAOTDR, 2007). Os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE) relativos a 2011 indicam uma produção de RSU de 486 kg por ano e por habitante, o que corresponde a um valor diário de 1,33 kg por habitante, ou seja, entre 2005 e 2011 existiu um crescimento da produção de RSU nos valores diários por habitante na ordem dos 7%.

No que diz respeito ao destino final dos RSU, com a total erradicação das lixeiras, a maior parte dos resíduos gerados passou a ser depositada em aterro (cerca de 60% em 2011). A implementação da incineração com recuperação de energia trouxe consigo a hipótese da valorização energética dos resíduos. Com a introdução da recolha seletiva, a reciclagem passou também a fazer parte dos destinos dos RSU em Portugal. Na Tabela 1.1 mostram-se os valores anuais da produção total de RSU em Portugal Continental de 2005 a 2011, bem como as repartições percentuais dos resíduos por destinos.

Tabela 1.1 – Produção anual e destinos dos RSU em Portugal Continental (Fonte: INE, 2012 e cálculos do autor)

Ano	Produção de RSU [milhões de ton]	Destino final dos RSU			
		Aterro	Valorização Energética	Valorização Orgânica	Reciclagem
2005	4,47	63,9%	21,0%	6,5%	8,6%
2006	4,64	66,4%	18,4%	5,6%	9,6%
2007	4,65	66,1%	17,8%	5,5%	10,6%
2008	5,14	67,0%	16,9%	5,9%	10,2%
2009	5,19	63,0%	18,5%	6,8%	11,7%
2010	5,18	62,7%	18,0%	7,6%	11,7%
2011	4,88	59,5%	19,8%	8,9%	11,8%

Da análise da Tabela 1.1 torna-se evidente que a deposição em aterro é o destino maioritariamente usado para os resíduos em Portugal. A esta seguem-se a incineração, com valorização energética, e a reciclagem.

Até 2005, Portugal registava um total de 29 sistemas de gestão de RSU, entre eles a Amarsul, empresa focada adiante (ver capítulo 2). Em termos de infraestruturas, salienta-se o aumento do número de aterros sanitários (construídos para a erradicação das lixeiras), estações de transferência e triagem. Para além disso, houve um claro aumento do número total de ecopontos, tendo-se registado, no período entre 2000 e 2005, um incremento superior a 100%.

Quanto aos fluxos especiais de resíduos (como, por exemplo, pilhas e acumuladores, pneus usados, veículos em fim de vida, entre outros) os princípios consignados na legislação nacional e comunitária assentam na co-responsabilização do produtor. Desta forma, o produtor passa a ser responsável pela recuperação do produto tornado resíduo e pela respetiva regeneração, valorização ou eliminação, bem como pela sucessiva redução da quantidade e perigosidade dos resíduos gerados. Foram, ainda, criadas diversas entidades gestoras para estes fluxos de resíduos (MAOTDR, 2007). Atualmente, algumas das entidades licenciadas para a gestão de fluxos especiais são: a Ecopilhas, para a gestão de pilhas portáteis e pilhas e acumuladores industriais; a Amb3E, para a gestão de equipamentos elétricos e eletrónicos; a Valormed, para a gestão de resíduos de embalagens e medicamentos e a Valorpneu, para a gestão de pneus usados (APA, 2012; APA 2013).

1.2 Motivação

A GRSU representa um desafio importante para a Europa (Garg *et al.*, 2009). O aumento do consumo associado ao aumento populacional resulta em maiores quantidades geradas de resíduos. Associado a este facto, o progresso tecnológico aumentou a complexidade dos produtos consumidos. Por vezes, e por conterem componentes perigosos, os referidos produtos requerem cuidados especiais na altura de serem descartados (Chalkias e Lasaridi, 2011). Desta forma, os RSU apresentam-se como constituindo um sério problema ambiental (Alam *et al.*, 2008).

Como já foi referido o processo de gestão de resíduos envolve a produção, recolha, armazenagem, processamento e deposição final dos resíduos. De todas estas operações a recolha é a mais dispendiosa. De facto, estimou-se em 2003 que os custos associados a esta operação representavam entre 50 a 70 por cento dos custos totais da gestão de resíduos sólidos, dependendo do método de deposição final escolhido (Tchobanoglous, 2003). Para reduzir estes custos, bem como as emissões poluentes inerentes, torna-se vital gerar estratégias de recolha eficientes (McLeod e Cherrett, 2008). A variação dos custos de recolha está relacionada com diferentes fatores, nomeadamente o número de recolhas efetuadas por unidade de tempo, a variação da quantidade de resíduos recolhidos por ponto de recolha, os veículos utilizados na operação, os custos associados à mão-de-obra, entre outros (Hogg, 2002).

No que aos veículos diz respeito, a marcha lenta dos seus motores (em particular para o caso dos camiões) sem qualquer movimentação dos bens transportados tornou-se um assunto de especial interesse nos últimos anos, na medida em que esse regime está associado a uma grande quantidade de combustível consumido, e consequentes emissões produzidas. Num estudo feito por Gaines *et al.*

(2006) foi estimado que o consumo total de combustível por parte dos motores de camiões em marcha lenta ascendia a cerca de 7,6 mil milhões de litros por ano, nos EUA. Nesse estudo os veículos de recolha de resíduos foram classificados como estando entre os cinco piores tipos de camiões em termos de eficiência no uso de combustível. Tal facto advém, maioritariamente, de estarem uma grande parte do tempo parados, com o motor a funcionar em marcha lenta, para descarga dos contentores ou no tráfego urbano. Por esse motivo, Gaines *et al.* (2006) recomendaram que o motor fosse desligado durante o esvaziamento do contentor para o camião.

No processo de recolha de resíduos sólidos, regra geral, são utilizados veículos com motor a gasóleo (Rhoma *et al.*, 2010). Sendo o gasóleo um produto que se obtém da refinação do petróleo, e tendo em consideração o elevado consumo descrito acima destes veículos, importa compreender qual o impacto económico, em termos energéticos, do processo de transporte dos resíduos.

1.2.1 Impacto económico da energia

O peso da energia na economia envolve múltiplas dimensões inter-relacionadas. Sendo esta um *input* básico em praticamente todos os processos produtivos, bem como uma componente importante das despesas das famílias, o seu impacto repercute-se não só em termos macroeconómicos, mas também na microeconomia.

A oferta de energia no mercado europeu e nacional envolve a transformação de fontes de energia primária, de modo a que se possa fazer uso dos diferentes tipos de energia. Desta forma, a extração e posterior transformação, por si só, é uma atividade económica que contribui para o valor acrescentado bruto e para o emprego. Os elevados investimentos associados a estes processos levam à existência de mercados dominados por um pequeno número de empresas que enfrentam uma curva de procura de energia rígida (*i.e.* a procura não diminui significativamente quando os preços aumentam). No entanto, por forma a serem solucionadas questões relativas à concorrência, existem autoridades de regulação, quer a nível nacional, quer a nível europeu.

Pelo seu impacto significativo em termos macroeconómicos, os choques nos preços da energia induzidos pela oferta são importantes condicionantes das flutuações económicas. De uma forma global, são afetados os custos de produção, a inflação e o produto, bem como a competitividade externa e os termos de troca. O choque será naturalmente maior para nações com maior dependência energética externa, *i.e.* aquelas onde a existência endógena de energia primária utilizável seja muito menor que a necessidade final. Nestes casos, para além de afetar o saldo da balança corrente, poderá haver uma exposição dos países a possíveis flutuações dos preços de mercado ou, mais grave, a possíveis cortes no abastecimento de energia associados à instabilidade política ou militar.

Por fim, sendo o aumento das preocupações ambientais uma constante nas últimas décadas, as políticas referentes à diminuição das emissões tornaram-se uma realidade importante. Tal facto trouxe consequências diretas sobre a produção e consumo de energia (Amador, 2010).

1.2.2 Consumo de energia em Portugal

A atividade da indústria transformadora de energia primária tem a sua génese na capacidade de transformação e utilização dessa energia. Esta primeira etapa depende, sobretudo, dos recursos naturais de cada país, bem como dos investimentos feitos em infraestruturas. Assim, a estrutura produtiva do setor de transformação de energia primária dos diversos países é muito heterogénea, mudando muito pouco ao longo do tempo.

Em Portugal a disponibilidade de energia primária está limitada a fontes renováveis. Este facto leva a que a dependência energética nacional seja consideravelmente superior à média da UE15. De facto, durante as últimas três décadas, a dependência energética portuguesa (*i.e.*, a parcela de energia fornecida à economia que é importada) tem-se situado em valores próximos dos 84% (Amador, 2010).

Contrariamente à estrutura produtiva da indústria transformadora de energia primária, a estrutura de consumo de energia primária é geralmente mais homogénea entre países. Dos diversos tipos de energia primária consumidos no território nacional o petróleo ocupa o primeiro lugar, com cerca de 55% em 2008. No entanto, desde a entrada do gás natural nas importações portuguesas, em 1997, o peso do petróleo tem vindo a diminuir gradualmente. Esta tendência tem-se verificado na grande maioria dos países da UE15, sendo estes dois tipos de energia primária responsáveis por mais de metade do consumo interno (Amador, 2010).

No que diz respeito à estrutura do consumo de energia final por setor, consideram-se seis grandes setores: indústria; residencial; agricultura, silvicultura e pescas; transportes; comércio e serviços públicos; e outros. O setor dos transportes e a indústria representam, cada um, um terço do consumo final de energia. No setor dos transportes esse facto pode ser explicado pela tecnologia subjacente ser intensiva em energia (*i.e.* necessita de elevadas quantidades de energia para funcionar). Especificando o consumo por tipo de transporte verifica-se uma quota superior a 95% por parte dos transportes rodoviários (Amador, 2010).

O elevado peso da componente de energia final consumida pelo setor dos transportes (em particular, os rodoviários), vem contribuir consideravelmente para a dependência energética do país. Em paralelo, o elevado custo de transportar os resíduos sólidos vem sobrecarregar os custos associados à gestão deste tipo de materiais. Desta forma, tornar a operação de recolha de resíduos mais eficiente, pela redução do seu consumo energético, traz benefícios não só em termos económicos, mas também em termos ambientais. A otimização das rotas percorridas pelos veículos é uma das formas possíveis para alcançar esse objetivo. Nguyen e Wilson (2010) apresentaram um modelo para estimar o consumo de combustível associado às atividades de recolha de RSU, cujos resultados de aplicação a um caso específico indicaram que a utilização de rotas otimizadas poderia reduzir, em média, o consumo de cada veículo em 7,5 l/dia.

É no âmbito desta temática que a presente dissertação se insere. Em particular, pretendeu-se neste trabalho obter um conjunto eficiente de rotas de recolha e transporte de RSU de um caso específico, através do uso de modelação adequada.

1.3 Principais objetivos do trabalho

Com este trabalho pretendeu-se obter conjuntos eficientes de rotas de recolha de RSU. Para tal, utilizou-se como estudo de caso a empresa Amarsul, que é responsável pela gestão dos RSU na margem Sul do Tejo.

Numa primeira fase, e através da aplicação ao problema de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), o *software* comercial *ArcGIS* (ESRI, 2010), obtiveram-se conjuntos eficientes de rotas utilizando estratégias diferentes. Num caso minimizou-se o tempo gasto na recolha e transporte do conteúdo de contentores de ecoponto, no outro a distância percorrida.

Numa segunda fase foi desenvolvido um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), utilizando a linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA), onde foram implementadas heurísticas para obter conjuntos eficientes de rotas. Este sistema foi utilizado para gerar dois conjuntos de rotas: um onde foi minimizado o tempo gasto e outro onde foi minimizada a distância percorrida no transporte e recolha de RSU. Os conjuntos de rotas obtidos com esta aplicação informática, onde foram minimizados o tempo despendido e a distância percorrida na recolha e transporte, foram então comparados com os que se obtiveram na primeira fase com o *software* comercial *ArcGIS*.

1.4 Organização do documento

O presente documento está dividido em seis capítulos. No capítulo 1 é contextualizado o problema do planeamento de rotas de recolha e transporte de RSU dentro da área da gestão dos resíduos sólidos. Foram definidos alguns conceitos em conformidade com a legislação nacional em vigor (nomeadamente resíduo, resíduo urbano e operações de gestão de resíduos), foram mencionadas algumas das estratégias atuais para a gestão dos resíduos em Portugal (que constam do PERSU II (MAOTDR, 2007)) e foram apresentados valores referentes ao panorama nacional de produção e destino final de RSU. Foi ainda descrita a motivação que está na base da realização deste trabalho, quer do ponto de vista ambiental, quer do ponto de vista da dependência energética do país (nomeadamente das importações de petróleo). Por fim, foram definidos os principais objetivos desta dissertação.

No capítulo 2 é feita uma breve apresentação da Amarsul, empresa cujo caso de estudo serviu de base à realização deste trabalho. De seguida, é caracterizado o sistema de recolha e transporte de resíduos de vidro reciclável da Amarsul no Município do Barreiro. São apresentados os dados relevantes para a resolução do problema de recolha e transporte de RSU em estudo, nomeadamente a rede de contentores de ecoponto que servirá de base ao problema, a estação de tratamento de resíduos, a frota de veículos de recolha e transporte que será utilizada e alguns tempos e custos operacionais. Esta informação constitui o estudo de caso desta dissertação.

No capítulo 3 é feita a revisão da literatura relevante para o problema de recolha e transporte de RSU. Primeiramente é mencionada a aplicabilidade da Investigação Operacional à resolução de problemas logísticos, considerando aspetos financeiros e efeitos externos como a poluição, ambos relevantes para o problema da recolha de RSU. De seguida é definido o problema do planeamento de

rotas de veículos (em inglês, *Vehicle Routing Problem* – problema VRP) e a sua adaptabilidade ao problema de transporte e recolha de RSU. São ainda mencionados os métodos de resolução do problema VRP, não só provenientes exclusivamente da Investigação Operacional, mas também provenientes dos sistemas de informação geográfica (SIG). Por fim, são apresentados estudos de casos em que existiam problemas de planeamento de rotas de recolha e transporte de RSU e respetivos métodos de resolução.

No capítulo 4 são apresentados os objetivos para a determinação das rotas de recolha e transporte de resíduos de vidro da Amarsul, bem como as duas abordagens utilizadas na resolução do problema VRP, nomeadamente o Sistema de Informação Geográfica (SIG) *ArcGIS* e o Sistema de Apoio à Decisão (SAD) *routePlanner*, que foi desenvolvido no âmbito deste trabalho. Para o *ArcGIS* são identificadas as duas funcionalidades internas que foram utilizadas para calcular as rotas de recolha e transporte – “*New VRP*” e “*New Route*” –, e os algoritmos que usam para o fazer. São ainda identificadas algumas das limitações deste sistema para a resolução do problema VRP. Para o *routePlanner* são apresentadas as principais funcionalidades deste sistema e visualizadas as principais características da sua interface de utilização.

No capítulo 5 é feita a apresentação e discussão dos resultados. Neste capítulo, para cada uma das ferramentas utilizadas (*ArcGIS* e *routePlanner*) são apresentados os resultados referentes aos conjuntos de rotas calculados minimizando a variável tempo e a variável distância. Depois comparam-se os resultados de cada uma das ferramentas: no caso do *ArcGIS* comparam-se os resultados obtidos através da funcionalidade “*New VRP*” com os resultados obtidos através da funcionalidade “*New Route*”; no caso do SAD *routePlanner* comparam-se os resultados obtidos através da heurística construtiva com os resultados obtidos através da heurística melhorativa. Por fim, comparam-se os resultados obtidos pelo *ArcGIS* com os resultados obtidos pelo *routePlanner*.

No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões retiradas neste trabalho e são ainda incluídos alguns pontos que poderão dar origem a outros trabalhos de investigação.

2 Apresentação da Amarsul e do estudo de caso

Em Portugal, a recolha e transporte de resíduos sólidos urbanos (RSU) serve-se de uma rede de contentores de recolha seletiva (denominados como ecopontos) e de recolha indiferenciada de resíduos, espalhados pelas áreas urbanas em agrupamentos municipais ou intermunicipais. No processo de recolha são utilizados veículos pesados de mercadorias que seguem, regra geral, um percurso pré-definido de forma algo empírica e que são carregados até atingirem a sua carga máxima, sendo posteriormente descarregados num depósito final ou intermédio. O conjunto de ecopontos a serem visitados por um veículo de carga até este atingir a carga máxima constituem uma rota. A sequência dos ecopontos, onde se incluem as ruas a percorrer, constitui um percurso, o que significa que uma rota pode ser constituída por um ou mais percursos.

A recolha de resíduos indiferenciados é feita em separado da dos resíduos recicláveis (recolha seletiva). Os resíduos para reciclagem podem ser recolhidos em simultâneo (misturados na caixa do camião de recolha ou colocados em divisórias separadas dessa caixa) ou separadamente por material (vidro, embalagens de plástico ou papel/cartão). A recolha em separado envolve a utilização de diferentes veículos (com compactação, no caso de papel/cartão; sem compactação, no caso de vidro) ou a atribuição de horários diferentes a cada material. Por conseguinte, são definidas rotas diferentes e autónomas para cada tipo de material (Beijoco, 2011).

O elevado número de restrições associadas ao problema de recolha de resíduos torna-o um problema complexo. Em termos gerais, a sua modelação envolve a obtenção de informação relativa a diferentes aspetos sociológicos, logísticos, económicos e geográficos. Segundo Chalkias e Lasaridi (2011) são necessários dados sobre: a densidade populacional da área a estudar; os fluxos gerados de resíduos indiferenciados e específicos; a quantidade, tipo e posição geográfica dos contentores da rede; as características da rede de estradas e do respetivo tráfego; o sistema atual de planeamento de rotas dos veículos de recolha; as capacidades e outras características dos veículos de recolha; os limites geográficos e as características topográficas dos setores de recolha.

Neste trabalho foi utilizado como estudo de caso o sistema de recolha e transporte de vidro da Amarsul. Na secção 2.1 e respetivas subsecções é feita uma breve introdução à Amarsul e são apresentados os dados referentes ao seu sistema de recolha e transporte que foram obtidos a partir do trabalho de Beijoco (2011).

2.1 A empresa Amarsul

Constituída em 1997 a Amarsul tem a concessão para o tratamento e valorização dos RSU dos nove municípios da Península de Setúbal (Alcochete, Almada, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela, Seixal, Sesimbra e Setúbal). A empresa serve atualmente cerca de 800 mil habitantes, estando o seu capital social dividido entre a Empresa Geral de Fomento (51%) (que é detida na totalidade pela Águas de Portugal) e os municípios inseridos na área de atuação (49%).

O portefólio de serviços prestados pela Amarsul engloba: a recolha de resíduos de embalagens domésticas através da sua rede de ecopontos; a recolha programada de cartão, porta-a-porta, em estabelecimentos comerciais, o que liberta os ecopontos da grande quantidade de cartão produzida

por este mercado; a lavagem e manutenção dos ecopontos, por forma a garantir as condições necessárias de utilização; a receção de resíduos no aterro sanitário, assegurando a proteção ambiental de acordo com a legislação em vigor; a receção de resíduos no ecocentro, onde podem ser depositados objetos volumosos como monos domésticos (por exemplo, sofás, colchões, móveis, entre outros), ramagens e aparas de jardins, resíduos de embalagens, jornais, revistas e óleos alimentares. De referir que a Amarsul não procede à recolha dos resíduos indiferenciados, sendo esta tarefa da responsabilidade das Autarquias Locais (Amarsul, 2011a e 2011b).

2.2 Sistema de recolha e transporte de resíduos de vidro reciclável da Amarsul

A Amarsul ocupa-se da recolha de vidro na zona do Barreiro, entre outros resíduos recicláveis. A recolha de resíduos de vidro reciclável é feita através de uma rede com 230 contentores de ecoponto para a recolha de resíduos de vidro e de uma frota de dois tipos de veículos distintos. Por conseguinte, o planeamento de rotas eficientes para a recolha dos resíduos recicláveis (incluindo as rotas de vidro que aqui são estudadas) representa potenciais poupanças para a empresa, nomeadamente pela redução dos custos em termos de tempo e/ ou da distância despendidos na recolha.

Este problema foi utilizado anteriormente no trabalho desenvolvido por Beijoco (2011), que definiu conjuntos de rotas geradas em ambiente SIG, com redução da distância percorrida e do tempo despendido. Nesta dissertação, para além de se recorrer a um SIG para resolver o problema em questão, foi utilizada uma abordagem alternativa, nomeadamente um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) com heurísticas (construtiva e melhorativa) implementadas. Os resultados obtidos da aplicação das referidas heurísticas foram comparados com os resultados da aplicação da ferramenta SIG.

Nas secções seguintes (2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4) é caracterizado o sistema de recolha e transporte de resíduos de vidro da Amarsul. Nelas são apresentados diferentes dados utilizados como base à resolução do problema VRP associado à recolha dos resíduos de vidro da Amarsul.

2.2.1 Rede de contentores de ecoponto

A Amarsul dispõe de 230 contentores de ecoponto para a recolha de vidro na zona do Barreiro. Na Figura 2.1 pode ser visualizada a distribuição geográfica destes contentores (representados na figura pelos círculos), bem como a localização da estação de tratamento da Amarsul (representado na figura por uma estrela), que é o ponto geográfico de partida e chegada dos veículos. Como seria expectável, a concentração de ecopontos é significativamente maior junto a áreas urbanas de maior densidade populacional e menor fora delas. A área em estudo de atuação da Amarsul (Município do Barreiro) está realçada na Figura 2.1 com a cor roxa, as autoestradas estão representadas por uma linha a vermelho, as estradas secundárias estão representadas por uma linha de cor cinzenta clara e as estradas principais estão representadas por uma linha de cor cinzenta escura.

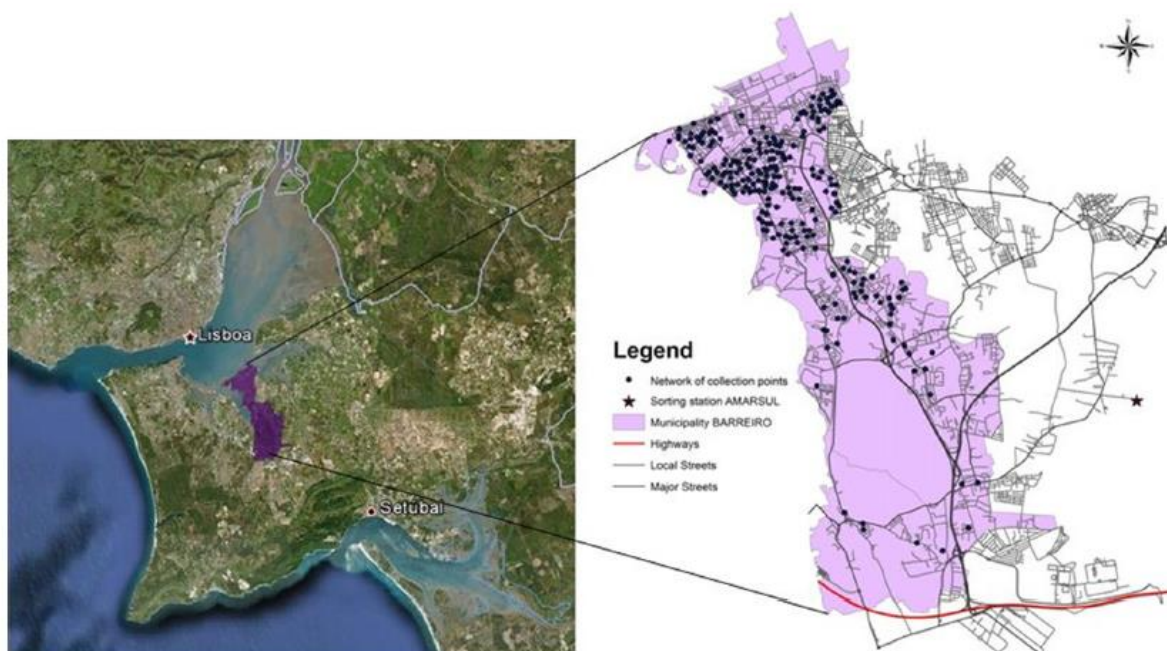


Figura 2.1 – Distribuição geográfica dos ecopontos de recolha de vidro e localização da Amarsul (Fonte: Zsigraiova et al., 2013)

2.2.2 Frota de veículos utilizada e custos operacionais específicos

Para a recolha dos resíduos de vidro reciclável, a Amarsul dispõe de dois veículos, sendo um do tipo A – veículo A – e outro do tipo B – veículo B. As características inerentes a cada um deles podem ser visualizadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Características dos veículos de recolha de vidro da Amarsul (Fonte: Beijoco, 2011)

Veículo	A	B
Combustível	Gasóleo	Gasóleo
Peso bruto [ton]	15	19
Tara [ton]	9,8	12,1
Carga máxima [ton]	5,2	6,9
Capacidade saturada [m ³]	15	20
Capacidade em vidro [m ³]	11,5	15,2
Características da caixa de carga	Caixa fixa; sem compactação	Caixa fixa; sem compactação

Segundo a legislação nacional, a tara corresponde

“ao peso do veículo em ordem de marcha, sem passageiros nem carga, com o líquido de arrefecimento, lubrificantes, 90% do total de combustível, 100% dos outros fluidos, exceto águas residuais, ferramentas e roda de reserva, quando esta seja obrigatória e, com exceção dos ciclomotores, motociclo, triciclos e quadriciclos, o condutor (75 kg), devendo

ainda ser considerado, no caso dos veículos pesados de passageiros, o peso do guia (75 kg) se estiver previsto um lugar específico para o mesmo” (MOPTC, 2010, p. 5886)

e o peso bruto é

“o conjunto da tara e da carga que o veículo pode transportar” (MOPTC, 2010, p. 5886).

Por conseguinte, o valor da carga máxima com a qual um veículo pode circular obtém-se da subtração do peso bruto e da tara.

A capacidade volumétrica máxima de transporte do veículo (capacidade saturada) difere da capacidade volumétrica máxima de transporte de vidro (capacidade em vidro), devido à massa volúmica do vidro, já que ambos os veículos atingem o seu peso bruto antes de atingir a sua capacidade saturada. Beijoco (2011) obteve um valor intermédio para a massa volúmica do vidro igual a 450 kg/m³.

Associado à operação de cada veículo existem custos específicos referentes à mão-de-obra necessária, à sua manutenção e ao combustível gasto durante o tempo em que se está a efetuar a tarefa de recolha. Os valores respeitantes a estes custos, obtidos do estudo feito por Beijoco (2011), são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Custos operacionais específicos dos veículos de recolha de vidro reciclável (Fonte: Beijoco, 2011)

Custos	Unidade	Veículo A	Veículo B
Mão-de-obra	€/h	24,41	24,41
Combustível	€/l	0,97	0,97
Manutenção	€/km	0,19	0,22

Por exigirem um igual número de trabalhadores para operar, o custo horário de mão-de-obra será o mesmo para os dois veículos. Uma vez que ambos os tipos de veículo utilizam gasóleo como fonte de energia, o custo por litro de combustível será o mesmo para os dois. Os valores de custos de manutenção por quilómetro diferem do veículo A para o veículo B pelas diferentes características físicas existentes entre os dois.

2.2.3 Circuitos de recolha de vidro atualmente existentes

A recolha do conteúdo dos ecopontos de vidro era, à data de 2011, feita com uma frequência de 3 a 4 semanas, perfazendo um ciclo de 12 semanas, e era composta por cinco circuitos (A, B, C, D e E) pré-definidos e inalteráveis. Um circuito é um conjunto de ecopontos com características semelhantes (e.g., a serem visitados na mesma data), podendo um ecoponto estar incluído em mais do que um circuito. Um circuito pode, assim, ser constituído por várias rotas, como já referido. A Tabela 2.3 apresenta dados dos cinco circuitos efetuados à data pela Amarsul.

Tabela 2.3 – Caracterização dos circuitos de recolha de vidro da Amarsul (Fonte: Beijoco, 2011)

Circuito	Frequência de recolha	Número de Ecopontos	Volume médio a recolher [m³]	Nível médio de Enchimento [%]
A	De 3 em 3 semanas	50	0,85	34
B	De 3 em 3 semanas	63	0,88	35
C	De 3 em 3 semanas	65	0,67	27
D	De 4 em 4 semanas	68	0,70	28
E	De 4 em 4 semanas	46	0,78	31

A frequência de recolha corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre duas realizações consecutivas de um determinado circuito. A cada um dos circuitos corresponde um determinado número de ecopontos que podem ser distribuídos por rotas diferentes e recolhidos por cada um dos tipos de veículos da frota da Amarsul dedicado a essa função (veículos A e B, caracterizados anteriormente na secção 2.2.2). Os ecopontos inseridos em cada um dos circuitos têm volumes médios a recolher, e conseqüentemente níveis médios de enchimento, diferentes. Estes dados foram calculados com base nos valores de enchimento de cada ecoponto da Amarsul, valores esses que constavam na base de dados que caracteriza o seu sistema de recolha e transporte de resíduos de vidro reciclável. De referir que, à data de 2011, as rotas executadas por cada veículo de recolha da Amarsul eram invariáveis, e não tinham o percurso definido inequivocamente: era dada alguma liberdade à equipa alocada a cada veículo para escolher o percurso em função do tráfego.

O tempo total que um determinado veículo demora a percorrer uma determinada rota e a recolher o conteúdo dos ecopontos nela incluídos é calculado pela soma do tempo de viagem com os tempos de serviço nos ecopontos e na estação de tratamento e com o tempo de espera em sinais de tráfego. No presente trabalho consideraram-se, analogamente ao considerado por Beijoco (2011) com base em dados fornecidos pela Amarsul, os seguintes tempos: 4,5 minutos como o tempo de serviço nos ecopontos; 10 minutos como o tempo de serviço na estação de tratamento e 3 minutos como o tempo de espera em sinais de tráfego.

Na Figura 2.2, e a título ilustrativo, encontram-se representadas duas rotas possíveis e distintas seguidas pelos dois tipos de veículos de recolha de resíduos de vidro da frota da Amarsul, para um dado circuito. A linha a azul-claro representa a rota seguida pelo veículo A, e a linha a verde representa a rota seguida pelo veículo B. Os círculos negros representam os ecopontos de recolha de vidro, os círculos verdes representam os ecopontos incluídos nas rotas percorridas, ou seja, os ecopontos visitados pelo veículo em questão, e a estrela representa a estação de tratamento da Amarsul.

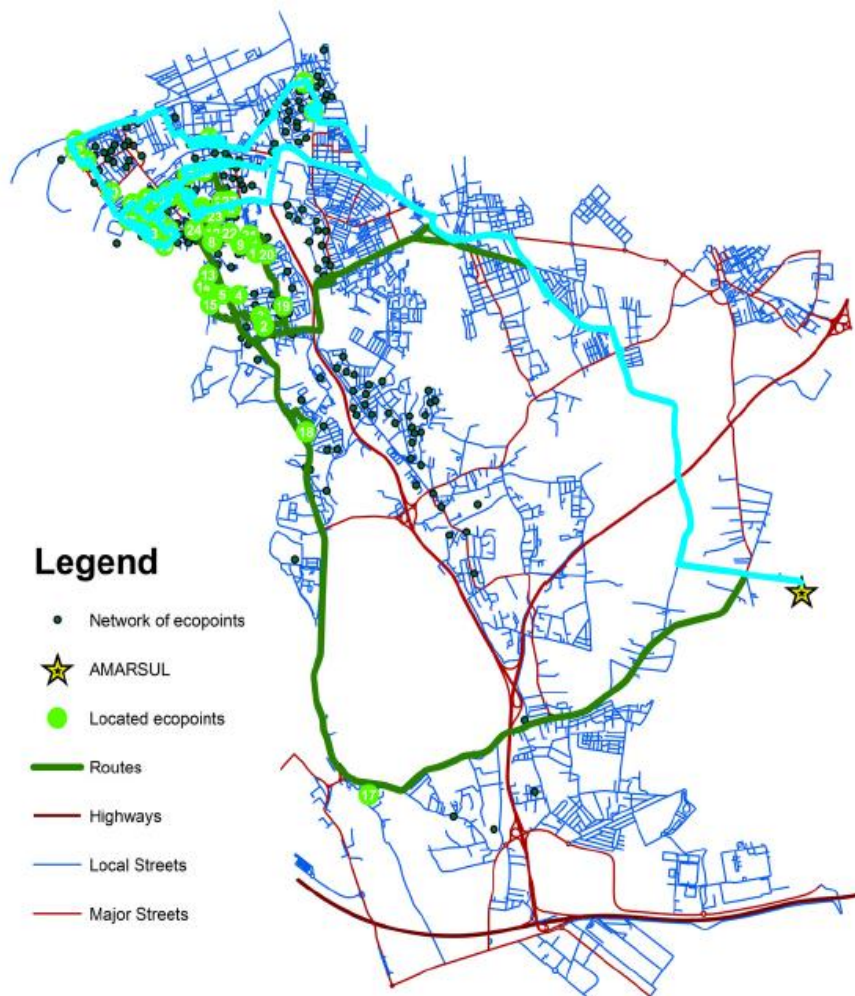


Figura 2.2 – Exemplo de duas rotas seguidas pelos veículos da Amarsul para um mesmo circuito (Fonte: Zsigraiova *et al.*, 2013)

2.2.4 Definição dos ecopontos a incluir em cada circuito

No presente trabalho foram calculadas as rotas de recolha dos resíduos dos contentores de ecoponto de cada um dos cinco circuitos da Amarsul identificados na Tabela 2.3. Como tal, a distribuição dos ecopontos por cada um dos circuitos para o qual foram calculadas rotas de recolha (circuitos A, B, C, D e E) é a mesma utilizada pela Amarsul à data de 2011.

3 Revisão da literatura

3.1 Conceitos e definições

3.1.1 A aplicabilidade da Investigação Operacional à Logística

O aumento da complexidade das organizações após a Revolução Industrial do séc. XIX trouxe consigo a proliferação da divisão de tarefas, bem como a segmentação das responsabilidades de gestão nas empresas. Como consequência, a existência de conflitos de interesses entre departamentos tornou-se num problema corrente, existente ainda nos dias de hoje. Desta forma, alocar os recursos disponíveis com o intuito de aumentar a eficiência da organização como um todo tornou-se num desafio difícil, mas de importância extrema. A Investigação Operacional (IO), que surge na Segunda Guerra Mundial para ajudar a solucionar problemas ligados a operações militares, tenta exatamente dar resposta às situações mencionadas.

A abordagem utilizada em IO tem início com a observação e formulação cuidadosa do problema a tratar. Depois procede-se à recolha dos dados relevantes para o problema. Na etapa seguinte constrói-se um modelo científico (regra geral, matemático), que deve retratar a essência do problema real. Por forma a verificar se o modelo representa de forma suficientemente precisa as características do problema, são realizados testes. Caso seja necessário, são introduzidas alterações ao modelo, ajustando-o, para o adequar ao problema real.

A aplicabilidade da IO é bastante vasta e tem sido utilizada para resolver problemas de produção, transporte, planeamento financeiro, assistência médica, militar e serviços públicos, entre outros (Hillier e Lieberman, 2001). A logística destaca-se como uma das áreas mais dinâmicas nas empresas pela sua procura constante de ganhos de eficiência. Christopher (2011) define logística como o

“processo de gerir estrategicamente a compra, transporte e armazenamento de matérias, componentes e produtos acabados (bem como fluxos de informação) ao longo da organização e dos seus canais de marketing, por forma a maximizar o lucro atual e futuro, através do cumprimento eficiente, em termos de custos, das encomendas” (p. 2).

Da definição anterior, torna-se óbvia a preocupação em maximizar o lucro através da minimização dos custos. Assim, as operações compreendidas nesta área procuram na IO respostas para melhorar a sua eficiência, por forma a que o lucro da organização seja o pretendido. No entanto, ainda que o retorno financeiro seja de extrema importância, cada vez mais existe uma preocupação para que a produção e distribuição de bens seja feita de uma forma sustentável, tendo em conta fatores ambientais e sociais (Sbihi e Eglese, 2007). Esta preocupação vê-se reforçada pela importância que o aquecimento global tem vindo a ocupar nos dias correntes, e pelos esforços para criar medidas de redução de emissões de gases com efeitos de estufa para a atmosfera por parte de muitos governos internacionais (Kuo e Wang, 2011).

Desta preocupação com questões ambientais surgiu o conceito denominado “logística verde” (em inglês, *green logistics*). A logística verde deixa de se centrar apenas no impacto económico na organização das atividades ligadas à logística, para passar a contabilizar os seus efeitos externos,

como, por exemplo, a poluição ambiental. As áreas que nela estão compreendidas são apresentadas de seguida:

- Logística inversa, onde vem considerado o ciclo de vida total do produto, incluindo as diversas possibilidades de reciclagem;
- Gestão de resíduos, cobrindo modelos de transporte de resíduos perigosos, recolha de RSU, entre outros;
- Modelos de rotas de veículos, que tenham em conta os objetivos ambientais e sociais (Sbihi e Eglese, 2007).

Uma perspectiva geral da aplicação de modelos que surgem da IO para melhorar sistemas logísticos pode ser encontrada na obra editada por Langevin e Riopel (2005).

3.1.2 O problema do planeamento de rotas de veículos

Na Europa, à data de 2012, o consumo de petróleo usado em atividades de transporte representava 73% do petróleo total consumido. Assim sendo, torna-se necessário o desenvolvimento de planos eficientes para tornar estas atividades sustentáveis. As rotas seguidas pelos veículos representam uma componente importante nos sistemas de distribuição e transporte, sendo estas alvo de inúmeros estudos existentes (Touati-Moungla e Jost, 2012). Introduzido por Dantzig e Ramser (1959) o problema do planeamento de rotas de veículos (em inglês, *Vehicle Routing Problem – VRP*) ocupa um lugar central na gestão das atividades ligadas à distribuição (Cordeau *et al.*, 2002). A sua importância económica advém do facto de ser um problema enfrentado diariamente por empresas de distribuição em todo o mundo (Laporte, 2007).

Para descrever problemas inerentes a áreas como a distribuição, a produção, o posicionamento de instalações, entre outras, recorre-se frequentemente à representação em formato de rede. De facto, diariamente deparamo-nos com inúmeros sistemas representados por meio de redes (*e.g.* redes de transportes, redes elétricas e redes de distribuição) (Hillier e Lieberman, 2001). Uma rede pode ser representada por um conjunto de linhas que unem pontos, por exemplo, estradas que ligam cidades, ou ruas que se unem através de cruzamentos (Tavares *et al.*, 2009). A esta representação dá-se o nome de grafo (em inglês, *graph*).

Um grafo é definido através de dois conjuntos de símbolos: os nós e os arcos. Primeiramente, define-se um conjunto N de pontos ou vértices, aos quais chamamos nós. De seguida, define-se também um conjunto A de arcos. Um arco pode ser representado por um par ordenado de nós que indica uma direção possível de movimento entre os mesmos. Por exemplo, o arco entre os nós i e j representa-se pelo par ordenado (i, j) , sendo o nó i o de partida e o nó j o de chegada. À sequência de arcos, em que cada arco tem exatamente um nó em comum com o anterior, chama-se cadeia. A uma cadeia cujo nó final corresponde ao nó inicial chamamos rota (Winston, 2003).

O problema do planeamento de rotas de veículos mencionado anteriormente é uma generalização do problema do caixeiro viajante (em inglês, *Travelling Salesman Problem – TSP*) (Christofides *et al.*, 1981). Dantzig *et al.* (1954) definem o problema TSP como a procura da rota mais curta para um caixeiro viajante, que parte de uma determinada cidade, visita uma e uma só vez um conjunto de

idades intermédias, e regressa à cidade de onde partiu. O problema TSP é definido num grafo $G = (N, A)$, onde N é o conjunto de nós (que representam as cidades) e A é o conjunto de arcos (que representam as ligações diretas entre as cidades). A formulação proposta por Dantzig *et al.* (1954), designada por formulação “convencional” (Orman e Williams, 2007), pode ser visualizada de seguida.

Sendo:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto dos n nós a visitar

x_{ij} é uma variável binária que é igual a 1 se o arco (i, j) pertence à rota e 0 no caso contrário

c_{ij} indica a distância associada ao arco (i, j)

A função objetivo do TSP consistirá em:

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{i, j \in M \\ i \neq j}} x_{ij} \leq |M| - 1 \quad \forall M \subset N \text{ tal que } \{1\} \notin M, |M| \geq 2 \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{para todos os } i, j \quad (5)$$

Expresso pela equação (1), o objetivo do problema TSP é minimizar a distância total percorrida pelo caixeiro viajante. A restrição imposta pela equação (2) assegura que só pode haver uma ligação que parte do nó i para outro nó. Por sua vez, a restrição imposta pela equação (3) assegura que só pode haver uma ligação a chegar de outro nó ao nó i . A restrição definida pela equação (4) impede a formação de sub-rotas, ou seja, obriga a que o caixeiro viajante passe por todas as cidades antes de retornar à cidade de origem.

Considere-se agora a seguinte situação: dado um conjunto n de nós e um número m de caixeiros viajantes localizados no nó de partida. Ao problema de determinar rotas para os m caixeiros viajantes, com início e fim no nó de partida, em que os nós intermédios são visitados apenas uma vez, e cuja distância percorrida na visita de todos os nós seja minimizada, chamamos problema m -TSP. Quando comparado com o problema TSP, o m -TSP adequa-se de melhor forma à modelação de situações da vida real, graças à sua capacidade de lidar com mais do que um caixeiro viajante (Bektas, 2006). Tal como o problema TSP também o m -TSP pode ser definido num grafo. Em Bektas (2006) pode ser encontrada uma possível formulação para o problema m -TSP, sendo ainda

apresentadas e discutidas diversas restrições presentes na literatura para a eliminação de sub-rotas. Abaixo encontra-se uma possível formulação.

Sendo:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto dos n nós a visitar

$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o arco } (i, j) \text{ pertence à rota} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

c_{ij} indica a distância associada ao arco (i, j)

m o número de caixeiros viajantes

u_i ou u_j a posição que o nó i ou j ocupam na rota

p o número máximo de nós que podem ser visitados por um caixeiro viajante

A função objetivo do m -TSP consistirá em:

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} = m \quad (7)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{j1} = m \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (10)$$

$$u_i - u_j + p x_{ij} \leq p - 1 \quad \text{para } 2 \leq i \neq j \leq n \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{para todos os } i, j \quad (12)$$

As restrições expressas pelas equações (7) e (8) asseguram que, exatamente m caixeiros viajantes partem e regressam à cidade de partida (representada pelo nó 1). A restrição dada pela equação (9) assegura que só pode haver uma ligação a chegar de outro nó ao nó i . A restrição definida pela equação (10) assegura que só pode haver uma ligação que parte do nó i para outro nó. A restrição dada pela inequação (11), formulada por Miller *et al.* (1960) impede a formação de sub-rotas. A expressão (12) é uma restrição de integralidade e obriga a variável x_{ij} a ter apenas um de dois valores possíveis: 1 caso o arco (i, j) pertença à rota e 0 caso contrário.

O problema m -TSP pode ser considerado uma relaxação do problema VRP através da remoção das restrições de capacidade (Bektas, 2006). De forma análoga ao problema TSP e ao problema m -TSP o problema VRP base também é definido num grafo. No entanto, no problema VRP os nós representam tipicamente clientes, os arcos representam as ligações entre os clientes e, em vez de

caixeiros viajantes, temos veículos de recolha ou distribuição. Considera-se que (Christofides *et al.*, 1981):

- O conjunto $N = N_c \cup \{0\}$, onde $N_c = \{1, \dots, n\}$ é um conjunto de n nós que representam os clientes e o nó 0 é o nó de partida e representa o armazém central.
- O conjunto $A = \{(i, j) : i, j \in N \wedge i \neq j\}$ é o conjunto dos arcos (i, j) que representam as ligações entre os pares de clientes (i, j) .
- A cada cliente i estão associadas as seguintes características:
 - a) uma determinada quantidade q_i de produto dever-lhe-á ser entregue por um determinado veículo;
 - b) a entrega da quantidade q_i ao cliente i apresenta um custo u_i .
- Assume-se uma frota de m veículos idênticos, cada um com uma capacidade igual a Q , que partem do armazém central (assume-se um número suficientemente grande de veículos para que possa existir uma solução possível).
- O custo associado ao caminho mais curto entre pares de clientes i e j (que pode ser, por exemplo, distância ou tempo de viagem) é dado através de uma matriz $C = \{c_{ij}\}$.
- O custo total de cada rota percorrida por cada veículo é obtido através da soma dos custos c_{ij} associados a cada arco (i, j) e da soma dos custos u_i associados aos clientes incluídos na rota, devendo este ser menor ou igual a um valor pré-estabelecido T .
- A procura total satisfeita em cada rota não deverá exceder Q .
- O objetivo do problema VRP aqui descrito prende-se com a determinação de rotas, uma para cada veículo, por forma a satisfazer a procura de todos os clientes, minimizando o custo associado a cada arco de todas as rotas.

Christofides *et al.* (1981) propuseram a formulação para o problema VRP que se descreve de seguida:

Sendo:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se o veículo } k \text{ visita o cliente } j \text{ imediatamente depois de visitar o cliente } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

y_i ou y_j a posição que o nó i ou j ocupam na rota

A função objetivo do problema VRP consistirá em:

$$\min z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij} \sum_{k=1}^m x_{ijk}) \quad (13)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ipk} - \sum_{j=0}^n x_{pj k} = 0, \quad k = 1, \dots, m, \quad p = 0, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(q_i \sum_{j=0}^n x_{ijk} \right) \leq Q, \quad k = 1, \dots, m \quad (16)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ijk} + \sum_{i=1}^n \left(u_i \sum_{j=0}^n x_{ijk} \right) \leq T, \quad k = 1, \dots, m \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, \quad k = 1, \dots, m \quad (18)$$

$$y_i - y_j + n \sum_{k=1}^m x_{ijk} \leq n - 1, \quad i \neq j = 1, \dots, n \quad (19)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \text{para todos os } i, j, k \quad (20)$$

As restrições definidas pelas equações (14-20) são explicadas da seguinte maneira: (14) assegura que cada cliente é visitado exatamente uma vez; (15) assegura que se um veículo visita um cliente também deverá partir desse cliente; (16) representa as limitações em termos de capacidade de cada rota; (17) representa as limitações em termos de custo de cada rota; (18) assegura que cada veículo é usado exatamente uma vez; (19) é a restrição que impede a formação de sub-rotas; (20) é a restrição de integralidade.

3.1.3 Variantes ao problema do planeamento de rotas de veículos

As abordagens existentes para a resolução de problemas VRP procuram determinar um conjunto de rotas de entrega ou recolha, a partir de um armazém central para um conjunto de clientes dispersos, usualmente sujeita a diversas restrições (Laporte, 2007). A adição de novas restrições para modelar de forma mais ajustada os problemas reais cria variantes ao problema VRP base descrito na secção 3.1.2. Das diversas possibilidades destacam-se as seguintes restrições adicionais: a existência de intervalos de tempo para visitar clientes; a heterogeneidade da frota de veículos; a possibilidade de realizar recolhas e entregas na mesma rota; a impossibilidade da visita a determinados locais; a necessidade de mais do que uma visita a determinados clientes, durante uma determinada janela de tempo; a existência de mais do que um armazém central; a possibilidade de as entregas serem divididas por diversos veículos (Cordeau *et al.*, 2002). A nomenclatura do problema VRP é alterada de acordo com as restrições adicionadas. A Tabela 3.1 enuncia alguns dos problemas mais comuns.

Tabela 3.1 – Denominação do problema VRP consoante a condição adicionada (Fonte: Makan *et al.*, 2011)

Condição adicionada	Denominação
Todos os veículos são idênticos, tendo uma capacidade máxima	<i>Capacitated VRP – CVRP</i>
Existência de uma frota heterogénea	<i>Mixed Fleet VRP - MFVRP</i>
Existência de janelas de tempo para servir o cliente	<i>VRP with Time Windows – VRPTW</i>
Possibilidade de retorno de alguns bens	<i>VRP with simultaneous Pick-Up and Delivering – VRPPD</i>
Existência de mais do que um armazém central	<i>Multiple Depot VRP – MDVRP</i>
Possibilidade dos clientes serem servidos por mais do que um veículo, devido a uma elevada procura	<i>Split Delivery VRP - SDVRP</i>

Facilmente se compreende, de uma forma geral, que o problema da recolha de RSU possa ser entendido como um problema de planeamento de rotas de veículos. Na recolha de RSU um conjunto de pessoas produz lixo que tem de ser recolhido por veículos. Primeiramente, assume-se a existência de um armazém central, que serve de local para estacionar e guardar os veículos e que é o ponto de partida. De seguida, a recolha de RSU está afeta a uma determinada área que pode ser uma freguesia, município, distrito ou país. Existe uma frota finita de veículos, um conjunto de locais de recolha (definidas pela localização dos contentores) e locais de descarga (definidas pela localização dos aterros ou estações de tratamento). Quando um veículo atinge a sua capacidade máxima precisa de ser descarregado no local mais próximo para esse efeito. Por fim, um veículo pode, e regra geral faz múltiplas viagens por dia (Kim *et al.*, 2006).

3.2 Métodos de resolução

3.2.1 Métodos de resolução exata

Laporte (1992) classifica os algoritmos para resolução exata de problemas de planeamento de rotas de veículos em três categorias: métodos de pesquisa em árvore (*branch and bound*), métodos de programação dinâmica e métodos de programação linear inteira. No seu estudo são apresentados um conjunto de algoritmos presentes na literatura e exemplificativos das categorias acima mencionadas. Baldacci *et al.* (2004), Dastghaibifar *et al.* (2008) e Baldacci e Mingozzi (2009) também apresentam exemplos de aplicação de métodos de resolução exata na solução de problemas VRP.

3.2.1.1 Complexidade

O problema do planeamento de rotas de veículos (problema VRP) é um problema combinatório NP-completo (Garey e Johnson, 1979), o que é uma forte indicação de não ser resolúvel em tempo polinomial (Wegener, 2005). Isto faz com que a solução ótima apenas seja encontrada para problemas com relativamente poucos pontos de entrega (ou recolha) (Cordeau *et al.*, 2002). No estudo feito por Laporte (1992) os algoritmos apresentados solucionavam problemas com um número

de nós que variava entre dez e 260. A revisão feita por Iori *et al.* (2007) mostra que, nos trabalhos que a antecederam, o número máximo de nós para os quais uma variante ao problema VRP (o problema CVRP) tinha sido resolvida por métodos de resolução exata foi igual a 135. Para se obter uma solução num tempo de computação razoável (ou seja, algumas horas num computador pessoal), esse número de nós teria de baixar para 100.

3.2.2 Métodos de resolução aproximada

A complexidade de alguns problemas pode tornar impossível a descoberta de uma solução ótima. Na realidade, a grande maioria dos problemas reportados de recolha de RSU não pôde ser resolvida por métodos de resolução exata (ver, *e.g.*, Kim *et al.*, 2006; Nuortio *et al.*, 2006; Coene *et al.*, 2008; Benjamin e Beasley, 2010; Makan *et al.*, 2011). No entanto, torna-se importante encontrar uma solução que se aproxime da ótima. Para tal, são utilizados métodos heurísticos.

Um método heurístico (ou heurística) é um procedimento que visa encontrar, para um problema específico, uma solução admissível que, não sendo exatamente a ótima, se aproxime desta (sendo a maior ou menor proximidade da solução ótima dependente da qualidade do método). Uma das vantagens da utilização de heurísticas prende-se com a eficiência das mesmas em lidar com problemas de grande dimensão. Regra geral, estes métodos são algoritmos iterativos, onde cada iteração procura uma nova solução melhor que a solução encontrada previamente. A solução fornecida pelo algoritmo será a melhor solução que foi encontrada até à última iteração.

Como referido anteriormente, os métodos heurísticos tendem a ser específicos por natureza, pois cada método é desenvolvido para resolver um problema específico. Por conseguinte, um novo tipo de problema requer o desenvolvimento de uma nova heurística. Com as meta-heurísticas é ultrapassada esta limitação. Uma meta-heurística é um método de resolução geral que fornece tanto uma estrutura como diretrizes estratégicas gerais para desenvolver um método heurístico particular que possa ser aplicado a um problema específico (Hillier e Lieberman, 2001).

3.2.2.1 Indicadores de comparação de heurísticas

Cordeau *et al.* (2002) constataram que os indicadores mais comuns para comparar heurísticas são a precisão do resultado obtido e a velocidade de execução. No entanto, também consideram relevantes a simplicidade do algoritmo e a flexibilidade de aplicação.

No que toca à precisão dos resultados obtidos, pretende-se a comparação entre o resultado fornecido pela heurística e a solução ótima. Não estando disponível a solução ótima, no caso de problemas como o VRP, as comparações têm de ser feitas com os melhores valores obtidos conhecidos. Neste campo, a consistência dos resultados é um fator bastante importante. Os utilizadores irão preferir uma heurística que produza sempre bons resultados, a uma que produza resultados ainda melhores umas vezes, mas muito piores noutras. Por fim, torna-se preferível um algoritmo que produza uma boa solução numa fase inicial, continuando a dar soluções melhores à medida que o programa é executado, a um que dê apenas uma solução final, depois de algum tempo de computação.

Em termos de velocidade de execução, há que ter em conta o *trade-off* entre precisão dos resultados obtidos e tempo de computação necessário para encontrar a solução. Por vezes, a necessidade de solucionar situações extremas como, por exemplo, a realocação de ambulâncias (*i.e.* a modificação de um escalonamento pré-estabelecido pela necessidade de transporte de doentes mais urgentes), requer encontrar rapidamente uma solução viável. No entanto, e não necessitando a maioria dos problemas de tanta urgência para obter uma solução, poder-se-á despende mais tempo na procura de melhores resultados. Cordeau *et al.* (2002) considera razoável gastar dez ou 20 minutos de tempo de computação num problema de rotas que tenha de ser resolvido diariamente parece razoável.

A difícil compreensão de determinadas heurísticas, associada à sua dificuldade de programação, fazem com que raramente sejam utilizadas. Heurísticas mais facilmente codificáveis são mais passíveis de serem escolhidas. Não obstante, por forma a não sacrificar demasiado a qualidade do resultado, é necessária alguma complexidade em termos de codificação. Algoritmos com demasiados parâmetros são, regra geral, mais difíceis de compreender e, por conseguinte, menos utilizados. Golden *et al.* (1998) constataram que, em busca de soluções cada vez melhores, as meta-heurísticas se têm tornado demasiado complexas pela introdução de demasiados parâmetros. Deste modo, a simplicidade do algoritmo deverá ser tida em consideração aquando da escolha heurística a utilizar.

Finalmente, a flexibilidade de aplicação das heurísticas que solucionam problemas VRP, traduz a capacidade das mesmas lidarem com restrições que se encontram na vida real. A maioria dos trabalhos da literatura preocupa-se com restrições ligadas à capacidade ou distância percorrida, mas também é possível introduzir alterações para acomodar restrições adicionais. No entanto, isso poderá resultar numa deterioração significativa de desempenho. Desta forma, grande parte da flexibilidade do algoritmo é alcançada através da simplicidade do mesmo (Cordeau *et al.*, 2002).

3.2.2.2 Heurísticas clássicas

As heurísticas clássicas estão divididas em heurísticas construtivas e heurísticas melhorativas. O termo “clássicas” advém do facto de estas partirem sempre de uma solução para outra melhor, na sua vizinhança, até não ser possível obter mais nenhum ganho (Laporte, 2007).

3.2.2.2.1 Heurísticas construtivas

De entre as diversas heurísticas construtivas (como por exemplo o mecanismo *sweep* de Gillett e Miller (1974) ou os métodos *cluster-first route-second* de Fisher e Jaikumar (1981) ou ainda os métodos *route-first cluster-second* de Beasley (1983), a mais popular é o algoritmo das poupanças de Clarke e Wright (1962). O seu princípio básico prende-se com a poupança nos custos que se obtêm através da junção de duas rotas separadas numa só (Lysgaard, 1997).

Imagine-se um exemplo em que, do armazém central (representado por 0), saem duas rotas, com dois arcos, um de ida, e outro volta, uma para o cliente i , e outra para o cliente j (ver rotas $(0,i,0)$ e $(0,j,0)$ na Figura 3.1 (a)). Da junção destas duas rotas, elimina-se, por exemplo, o arco

correspondente à volta do cliente i para o armazém central $(i,0)$, bem como o arco correspondente à ida do armazém central para o cliente j $(0,j)$, e adiciona-se o arco correspondente ao percurso do cliente i para o cliente j (i,j) (ver Figura 3.1 (b)). A poupança adjacente a esta junção pode ser obtida através da soma dos custos dos arcos retirados $(i,0)$ e $(0,j)$, subtraída do custo do arco adicionado (i,j) .

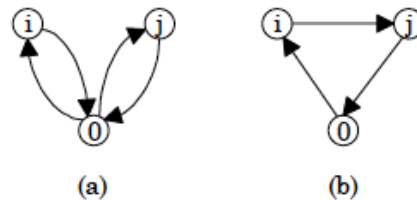


Figura 3.1 – Ilustração do princípio das poupanças (Fonte: Lysgaard, 1997)

Existem duas versões deste algoritmo: uma sequencial e outra paralela. Na versão sequencial, constrói-se uma rota de cada vez, ao passo que na paralela, poderão ser construídas mais do que uma rota simultaneamente (Lysgaard, 1997). Esta última é a melhor variante ao algoritmo, já que a junção que produz a maior poupança é implementada em cada iteração, terminando o algoritmo quando deixam de existir junções possíveis.

A popularidade deste procedimento advém da sua rapidez e simplicidade de implementação, não obstante o facto de este não ser o algoritmo com maior precisão. No entanto, dada a importância atual das heurísticas melhorativas (particularmente as meta-heurísticas), um esquema simples, como o algoritmo das poupanças, é adequado para a solução da maior parte dos casos (Laporte, 2007).

3.2.2.2 Heurísticas melhorativas

Existem dois tipos de heurísticas melhorativas que podem ser aplicadas ao problema VRP: heurísticas internas às rotas (intra-rotas) e heurísticas entre rotas (inter-rotas) (Laporte e Semet, 2002).

As heurísticas intra-rotas fazem a pós-otimização, de forma separada, de cada rota obtida. Dois dos algoritmos deste tipo mais utilizados são o 2-Opt (Flood, 1956) e o 3-Opt (Lin, 1965). No algoritmo 2-Opt, cada rota obtida é modificada através da eliminação de dois arcos, obtendo-se duas cadeias separadas. De seguida, as duas cadeias são novamente ligadas da outra maneira possível (na Figura 3.2 pode ver-se que os arcos (a,b) e (c,d) são substituídos pelos arcos (a,d) e (b,c)). No algoritmo 3-Opt, são trocados arcos da rota obtida até um limite de três (num dos exemplos da Figura 3.3 pode ver-se que os arcos (a,b) , (c,d) e (e,f) são substituídos pelos arcos (a,d) , (b,e) e (c,f)) (Johnson e McGeoch, 1997).

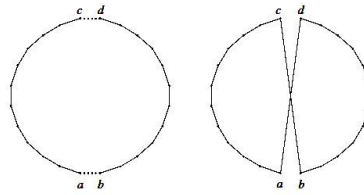


Figura 3.2 – Rearranjo usando o 2-Opt: rota original à esquerda e rota resultante à direita (Fonte: Johnson e McGeoch, 1997)

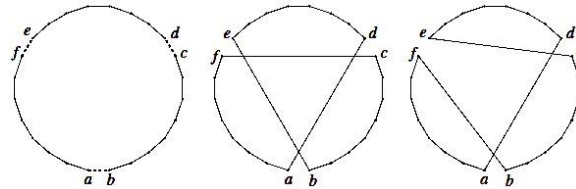


Figura 3.3 – Dois possíveis rearranjos usando o 3-Opt: rota original à esquerda e rotas resultantes à direita (Fonte: Johnson e McGeoch, 1997)

As heurísticas inter-rotas consistem na mudança de nós entre diferentes rotas. Como exemplos destas heurísticas temos a 2-Opt* (Potvin e Rousseau, 1995) e a CROSS (Taillard *et al.*, 1997). Na Figura 3.4, vem exemplificado o procedimento aplicado pela heurística CROSS. Os quadrados pretos no início e fim correspondem ao armazém central e os círculos brancos correspondem aos clientes servidos na rota. Inicialmente, são removidos os dois arcos (X_1, X'_1) e (Y_1, Y'_1) da primeira rota e os dois arcos (X_2, X'_2) e (Y_2, Y'_2) da segunda rota. De seguida, os segmentos $X'_1 - Y_1$ e $X'_2 - Y_2$, que podem conter um número arbitrário de clientes, trocam de rota pela introdução dos arcos (X_1, X'_2) , (Y_2, Y'_1) , (X_2, X'_1) e (Y_1, Y'_2) . A heurística 2-Opt* (Potvin e Rousseau, 1995), exemplificada na Figura 3.5, muda apenas dois arcos de diferentes rotas e é obtida quando Y_1 e Y_2 estão ligados ao armazém central. Portanto a heurística 2-Opt* é um caso particular da heurística CROSS.

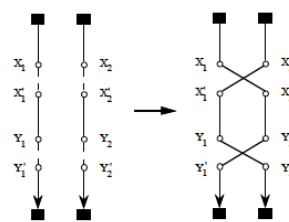


Figura 3.4 – Exemplo do procedimento da heurística CROSS (Fonte: Taillard *et al.*, 1997)

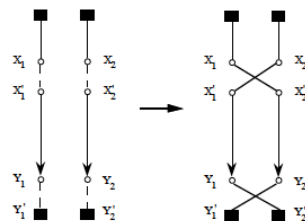


Figura 3.5 – Exemplo do procedimento da heurística 2-Opt* (Fonte: Taillard *et al.*, 1997)

3.2.2.3 Meta-heurísticas

As meta-heurísticas permitem a exploração do espaço de soluções, para além do primeiro ótimo local encontrado. Nelas estão incorporados procedimentos provenientes de heurísticas clássicas e melhorativas. Em termos de categorias, as meta-heurísticas podem ser classificadas em meta-heurísticas de pesquisa local (*local search*), de pesquisa populacional (*population search*) e de mecanismos de aprendizagem (*learning mechanisms*). A explicação de cada tipo de meta-heurística mencionada pode ser encontrada em Laporte (2007) e em Cordeau *et al.* (2005).

Exemplos de algoritmos de pesquisa local com aplicação ao problema VRP são o algoritmo *record-to-record travel* (Dueck, 1993), o algoritmo *tabu search* (Glover, 1986) e o algoritmo *variable neighbourhood search* (Mladenovic e Hansen, 1997). Exemplos da aplicação da pesquisa populacional ao problema VRP são os estudos de Rochat e Taillard (1995) e Tarantilis e Kiranoudis (2002). Exemplos da aplicação de mecanismos de aprendizagem ao problema VRP são os estudos de Bell e McMullen (2004) e Mazzeo e Loiseau (2004).

Uma revisão da literatura completa sobre esta temática pode ser encontrada em Gendreau *et al.* (2008). Esta é constituída por artigos recentes que aplicam meta-heurísticas à solução de problemas VRP. Os artigos incluídos nesse estudo são considerados pelos autores como tendo tido um impacto significativo no desenvolvimento da investigação deste problema.

3.2.3 Sistemas de Informação Geográfica – SIG

Para além dos métodos de resolução exata apresentados na secção 3.2.1 e dos métodos de resolução aproximada descritos na secção 3.2.2, o recurso a *software* como os sistemas de informação geográfica (SIG) para resolução de problemas VRP tem aumentado. As mudanças organizacionais e o desenvolvimento tecnológico na indústria da gestão de resíduos têm sido uma constante dos últimos tempos (Karadimas *et al.*, 2008). A melhoria dos serviços oferecidos, não só em termos de qualidade, mas também no que diz respeito aos custos, tornou-se uma prioridade (Chalkias e Lasaridi, 2009). Por conseguinte, tanto organismos públicos, como privados, têm vindo a utilizar novas tecnologias, como *software* destinado à criação de rotas, na sua gestão diária (Karadimas *et al.*, 2008). Nuortio *et al.* (2006), por exemplo, reporta a existência de diversos estudos que envolvem a solução de problemas de planeamento de rotas com recurso a computadores.

Uma vez que um modelo de criação de rotas faz uso de um elevado número de dados espaciais, o uso de SIG torna-se bastante relevante, já que estes têm demonstrado lidar de uma forma eficiente com a análise de problemas com informação espacial complexa (Tavares *et al.*, 2009; Chalkias e Lasaridi, 2009). Segundo Tavares *et al.* (2008),

“a tomada de decisão eficaz, no campo dos sistemas de gestão, requer a implementação de técnicas de roteamento de veículos capazes de tirarem vantagem de novas tecnologias, como os sistemas de informação geográfica” (p. 445).

Não só pelos factos descritos anteriormente, mas também pela sua abrangência na aplicabilidade a diversos problemas do quotidiano, a utilização de SIG sofreu um crescimento exponencial nos últimos tempos (Karadimas *et al.*, 2008).

3.2.3.1 Definição de SIG e seus benefícios

Um SIG é um *software* de computador que relaciona informação geográfica (localização de um determinado objeto) com informação descritiva (descrição das características desse objeto). Ao contrário de um mapa físico, onde apenas se consegue visualizar o que nele está impresso, os SIG organizam a diferente informação em camadas (*layers*) sob a forma de um mapa digital. Cada camada representa uma particularidade distinta do mapa criado em SIG. Por exemplo, uma camada poderá representar todas as estradas numa determinada área, outra poderá representar todos os lagos e ainda outra poderá representar todas as cidades (Chalkias e Lasaridi, 2011; ESRI, 2012). Desta forma, os SIG contêm informação espacial acerca de cidades, estados, países, ruas, lagos e outras características geográficas, e suportam aplicações que combinam essa informação espacial com informação não espacial (por exemplo, informação temporal) (Ramakrishnan e Gehrke, 2002).

Para além de serem uma ferramenta de apoio à decisão, os SIG acarretam inúmeros benefícios às organizações que adotam a sua utilização. Destacam-se a redução de custos, provenientes de um aumento da eficiência na pesquisa de dados, bem como a melhoria no armazenamento de dados históricos (ESRI, 2012). No que toca à recolha de resíduos sólidos urbanos, o planeamento deste serviço recorrendo a SIG, pode trazer consigo grandes melhorias de eficiência e eficácia, não só em termos ambientais, mas também económicos. Tal facto torna-se possível através da redução dos tempos de viagem, distância percorrida, consumo de combustível e consequentes emissões poluentes (Chalkias e Lasaridi, 2009). De facto, a aplicação dos SIG ao estudo de sistemas complexos de gestão de resíduos, nomeadamente transporte e recolha de resíduos, bem como localização de infraestruturas para a deposição dos mesmos, tem sido uma das aplicações principais deste tipo de tecnologia (Chalkias e Lasaridi, 2011).

3.2.3.2 Software ArcGIS e extensões mais relevantes

O ArcGIS é um *software* da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), que permite criar, editar e analisar informação geográfica, por forma a melhorar a tomada de decisão (ESRI, 2010). Das inúmeras extensões existentes para este programa, destacam-se, para a solução de problemas de otimização de rotas, a *ArcGIS Network Analyst* e a *ArcGIS 3D Analyst*.

Como referido na secção 3.1.2, uma rede pode ser descrita por um conjunto de arcos que ligam nós, por exemplo, estradas que ligam cidades ou ruas que se juntam em cruzamentos. Os atributos destas redes são propriedades dos elementos que as constituem. Exemplos disso são o tempo que determinada estrada demora a ser percorrida, o consumo de combustível para uma determinada distância, as restrições à circulação de determinados tipos de veículo, os limites de velocidade, bem como os sentidos únicos de circulação em determinadas estradas (Tavares *et al.*, 2009).

A extensão *Network Analyst* possibilita ao utilizador a modelação de redes e consequente análise das mesmas por forma a encontrar rotas de viagem eficientes, determinar qual a instalação ou o veículo mais próximo, gerar direcções de viagem e encontrar uma área de serviço em redor de um local. Ao custo minimizado pela *Network Analyst* no planeamento de uma determinada rota, dá-se o

nome de impedância. Esta é quantificada e modelada através de atributos como a distância percorrida ou o combustível consumido (Karadimas *et al.*, 2007; Tavares *et al.*, 2009).

O algoritmo usado por esta extensão é o algoritmo de Dijkstra (1959) que, por ser o algoritmo mais simples para encontrar o caminho mais curto entre dois pontos, reduz o tempo e capacidade de computação necessários (Karadimas *et al.*, 2007). Em termos gerais, este método divide a rede nos nós de intersecção dos caminhos, representando os caminhos por linhas e ficando-lhes associado um custo. Existem inúmeros caminhos possíveis desde a origem até ao destino final, dependendo, o caminho escolhido, dos nós a visitar bem como da ordem pela qual a visita é feita. A escolha dos nós a visitar é feita iterativamente, comparando o nó candidato a visitar de seguida, em termos de custos, com todas as outras opções possíveis (Oliveira, 2002, citado por Karadimas *et al.*, 2007).

No que toca à extensão *3D Analyst*, e através desta, podem ser criados modelos de redes em 3D, podendo ser feita a sua visualização de diversos pontos de vista. Uma das suas características mais relevantes ao estudo do problema VRP, prende-se com a incorporação da inclinação dos caminhos percorridos na análise e solução do problema (ESRI, 2011), assunto que foi tratado por Tavares *et al.* (2009).

3.3 Resultados de investigação prévia relativamente à gestão de resíduos sólidos urbanos

3.3.1 Estudos feitos com recurso a métodos de resolução exata

Kulcar (1996) apresentou um caso de otimização da recolha de resíduos sólidos em Bruxelas, Bélgica. Para tal, foi desenvolvida uma metodologia composta por duas fases, uma de programação inteira mista e outra de programação inteira, onde se pretendia a minimização dos custos globais de transporte. Aos resultados obtidos foram feitas análises de sensibilidade, tendo em conta os diferentes meios de transporte que podiam ser utilizados (rodoviário, ferroviário e marítimo), bem como a incerteza relativa aos custos fixos de novos armazéns.

Nema e Gupta (1999), através do uso de programação inteira multiobjectivo, apresentaram uma configuração ótima para um sistema de gestão de resíduos perigosos. Esta envolvia a seleção das estações de tratamento e deposição a utilizar, bem como a respetiva alocação dos resíduos gerados e ainda a seleção das rotas de transporte. Os objetivos do modelo foram a minimização do custo total (obtido da soma dos custos de deposição com os custos de transporte dos resíduos), a minimização do risco total (que envolvia o risco associado ao tratamento e deposição dos resíduos, bem como do transporte) e a minimização de uma função composta onde estavam englobados tanto o risco como o custo total. Por fim, foi aplicada a formulação feita a um caso de estudo exemplificativo para demonstrar a sua mais valia aos gestores desses resíduos.

Badran e El-Haggar (2006), foram pioneiros na otimização de um sistema de resíduos sólidos no Egipto. Para tal, desenvolveram um modelo de programação inteira mista para a cidade de Port Said, onde estava incluído o conceito de estações de recolha (infraestruturas que ainda não haviam sido utilizadas no país). O melhor modelo obtido englobava 27 estações de recolha de 15 toneladas

diárias, bem como duas estações de 10 toneladas diárias. A solução foi obtida através do uso de um *software* específico – MPL 4.2 (Maximal Software, Inc., 2006).

Por sua vez, Komilis (2008) ilustrou um caso de estudo para um município de Atenas, Grécia. O autor desenvolveu dois modelos de programação linear inteira mista para a otimização do transporte e transferência de RSU anterior à fase de incineração: um modelo cujo objetivo é minimizar o tempo e outro cujo objetivo é minimizar o custo total. O modelo de minimização do custo difere do de minimização do tempo pela utilização de diferentes custos para diferentes veículos utilizados, bem como pela inclusão de estações de transferência de resíduos. As conclusões deste estudo evidenciaram que o modelo de otimização do tempo é de mais fácil desenvolvimento pela maior facilidade no acesso a dados como distâncias entre nós. No entanto, este modelo deve ser aplicado apenas a situações em que só é utilizado um tipo de veículo e não existem estações de transferência. O modelo de otimização de custos é mais abrangente, mas a sua aplicação depende da existência do conhecimento de custos que sejam representativos do caso em estudo.

Ramos *et al.* (2013) partiram de um caso de estudo real de um sistema de recolha de resíduos recicláveis cujo problema se centrava na definição das áreas de serviço do sistema e das rotas de recolha e transporte associadas. Este problema foi modelado como um problema VRP com múltiplos armazéns centrais e com rotas entre eles, e os autores tinham como objetivo encontrar uma solução sustentável, *i.e.* que conciliasse as dimensões económica, ambiental e social. Para solucionar o problema, os autores desenvolveram uma abordagem baseada em modelos de programação linear inteira mista. A dimensão económica foi modelada através da distância percorrida pelos veículos de recolha, o que influencia diretamente a variável custo, e a dimensão ambiental foi modelada através dos cálculos das emissões de CO₂ associadas à recolha e transporte. Por fim, a dimensão social foi incorporada através da definição de uma solução equilibrada em termos da divisão das horas de trabalho pelos motoristas dos veículos. Os autores concluíram que, quando foram minimizados os objetivos económico e ambiental, a solução apresentou desequilíbrios em termos das horas de operação de cada veículo. Contrariamente, quando o objetivo social foi minimizado e todos os motoristas trabalhavam o mesmo número de horas verificou-se um aumento significativo da distância percorrida e das emissões de CO₂. A solução eficiente, tendo em conta os três objetivos, foi encontrada quando a distância foi minimizada até a um ponto ideal.

Lopes *et al.* (2015) estudaram cenários possíveis para a otimização do sistema de recolha de resíduos recicláveis da Valorsul, empresa responsável pelo tratamento e valorização de resíduos urbanos produzidos em 19 Municípios da Grande Lisboa e da Região Oeste. Os três cenários estudados usavam dois ou três armazéns centrais, *i.e.* para além do armazém central já utilizado pela Valorsul foi estudado o uso de duas estações de transferência existentes como armazéns centrais. Através destes três cenários objetivou-se a redução da distância percorrida e do tempo gasto na recolha dos resíduos. Para solucionar este problema, que foi categorizado como um problema VRP múltiplos produtos e múltiplos armazéns centrais, os autores adaptaram a modelação desenvolvida por Ramos *et al.* (2014). Os resultados obtidos permitiram concluir que a melhor solução envolvia a implementação de dois armazéns centrais nas localizações das duas estações de transferência

existentes. Caso a empresa quisesse manter apenas um armazém central, o estudo concluiu que a localização do armazém central deveria ser alterada.

Em suma, os artigos mencionados nesta secção mostram a adequabilidade dos métodos de resolução exata na solução de problemas VRP de dimensão reduzida aplicados à recolha de resíduos. Nuns estudos foram analisados diferentes meios de transporte a utilizar (Kulcar, 1996); noutros as infraestruturas a incluir nos sistemas de gestão de resíduos (Badran e El-Haggar, 2006; Komilis, 2008). Os objetivos dessas análises foram a minimização dos custos globais (Kulcar, 1996; Nema e Gupta, 1999), minimização do tempo de duração da recolha (Komilis, 2008) e ainda minimização do risco associado ao tratamento e deposição dos resíduos (Nema e Gupta, 1999). Um dos problemas reportados foi a incerteza relativa aos custos (Kulcar, 1996; Komilis, 2008).

3.3.2 Estudos feitos com recurso a métodos de resolução aproximada

Kim *et al.* (2006) trataram o problema da recolha de resíduos como sendo uma variação ao problema VRPTW, já que incluía múltiplas viagens feitas por cada veículo e a interrupção para almoço. Estes autores efetuaram uma extensão ao algoritmo de inserção de Solomon (1987) para considerar as operações de deposição dos resíduos, a possibilidade de um veículo efetuar mais do que uma rota e a existência de intervalos de tempo para almoço dos trabalhadores.

A inclusão do horário de almoço foi feita através da criação de uma paragem na janela temporal entre as 11 horas e as 12 horas. A distância percorrida entre duas paragens, ou o tempo associado a essa deslocação, foram obtidas através da aplicação do algoritmo de Dijkstra (1959) em ambiente SIG. Desta aplicação, os autores obtiveram uma tabela de tempos de viagem entre cada duas paragens. Em relação aos objetivos, pretendia-se minimizar o número de veículos utilizados e o tempo de viagem, maximizar a compactabilidade das rotas (*i.e.* minimizar a sobreposição de rotas nas mesmas áreas) e equilibrar as cargas de trabalho entre veículos.

Nesse estudo, os autores reportam três problemas subjacentes ao algoritmo de inserção utilizado. O primeiro prende-se com a pouca compactabilidade das rotas geradas. O segundo diz respeito ao desequilíbrio da carga de trabalho, já que as primeiras rotas criadas apresentam um número de paragens maior do que as últimas. O terceiro está relacionado com o elevado tempo de computação necessário, já que, mesmo sendo muito mais rápido que um algoritmo *tabu search* (Glover, 1986), por exemplo, continua a apresentar tempos de resolução elevados, especialmente para problemas de grande dimensão.

Para ultrapassarem os problemas descritos Kim *et al.* (2006) desenvolveram um algoritmo *clustering-based*. Da comparação dos dados obtidos através dos dois algoritmos utilizados, verificou-se uma melhoria em todos os problemas detetados com a aplicação do algoritmo *clustering-based*, *i.e.* maior compactabilidade das rotas geradas, maior equilíbrio da carga de trabalho e menor tempo de resolução.

Por forma a melhorar as soluções geradas, quer pelo algoritmo de inserção, quer pelo algoritmo *clustering-based*, foi ainda utilizada uma meta-heurística *simulated annealing*, usando o método CROSS *exchange local search* proposto por Taillard *et al.* (1997). Esta meta-heurística foi aplicada às soluções de cada um dos algoritmos, tendo sido melhorados, para ambos, os resultados obtidos.

O algoritmo *clustering-based* com *simulated annealing* foi incorporado na aplicação *WasteRoute* desenvolvida pelos autores, tendo em conta as especificações da *Waste Management, Inc.*, empresa líder em serviços de gestão de resíduos nos EUA. Num dos casos em que esta foi aplicada (cidade de Elgin, Illinois), contabilizou-se uma poupança de 18 milhões de dólares num ano. Este facto deveu-se à diminuição de 984 rotas de recolha.

Também Benjamin e Beasley (2010) consideraram um problema VRPTW em que as janelas temporais estavam associadas aos clientes, aos locais de deposição e ao armazém central. Nesse estudo, os autores consideraram o mesmo problema analisado por Kim *et al.* (2006), fazendo uma comparação direta dos resultados de ambos os trabalhos. Para tal, começaram por desenvolver um procedimento que gerasse uma solução inicial, sobre a qual aplicaram três meta-heurísticas.

O procedimento começa pela definição do conjunto de clientes mais próximos a um determinado cliente com janelas temporais compatíveis. De seguida, é obtida uma solução inicial em que se procura utilizar a capacidade total dos veículos. Quando um veículo atinge a sua capacidade máxima é gerada uma nova rota feita por outro veículo. Desta forma pretende-se minimizar o número de veículos utilizados. Por forma a melhorar as rotas geradas pelo algoritmo criado os autores adotaram um procedimento *local search*.

De forma análoga ao estudo de Kim *et al.* (2006), em alguns problemas, as últimas rotas geradas serviam poucos clientes, podendo ser ainda possível uma redução dos veículos utilizados. Para solucionar este problema, os autores implementaram um procedimento onde, caso fosse possível, se passavam clientes das últimas rotas para rotas anteriormente estabelecidas.

Após gerar uma solução inicial, foram aplicadas três meta-heurísticas – *tabu search* (TS), *variable neighbourhood search* (VNS) e uma combinação das duas anteriores, baseada na VNS, mas onde a procura de clientes no conjunto é feita através de TS (VNTS). Todas elas partiram da solução gerada pelo algoritmo inicial criado pelos autores.

Em termos de soluções finais, é de referir a menor distância conseguida através das meta-heurísticas (TS, VNS e VNTS) utilizadas pelos autores, em comparação com o algoritmo *clustering-based* de Kim *et al.* (2006) (cerca de 5.6% em média). No entanto, o tempo computacional necessário é maior para estas três meta-heurísticas do que para a de Kim *et al.* (2006).

Coene *et al.* (2008) descreveram o problema referente a uma empresa belga que procede à recolha de resíduos provenientes de matadouros, talhos e supermercados. Pelo facto do planeamento das rotas ser feito para um período de vários dias, onde os clientes são visitados com diferentes frequências, os autores consideraram-no uma variante ao problema *periodic VRP* - PVRP.

A solução deste tipo de problemas é feita, segundo os autores, em duas fases. Numa primeira abordagem, essas fases são constituídas pela definição inicial dos clientes a incluir nos diferentes dias e pela solução posterior do problema VRP para cada dia em separado. Numa segunda abordagem, a primeira fase passa pela definição das rotas de recolha e a segunda fase passa pela alocação das rotas obtidas a diferentes dias da semana. O estudo apresentado foca-se na primeira abordagem. No entanto, também é descrito e aplicado um algoritmo referente à segunda.

Na primeira abordagem, a primeira etapa passa por definir quais os clientes a visitar nos diferentes dias. Para tal, é encontrado um cenário para cada cliente, bem como um conjunto de rotas

para cada dia do período considerado, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida. A afetação dos clientes pelos dias é feita por dois algoritmos: o algoritmo ES e o algoritmo CL. O algoritmo ES tem por objetivo atribuir um cenário a cada cliente, de maneira a que as visitas estejam dispersas uniformemente pelo período considerado. Neste caso, a localização dos clientes é totalmente ignorada, podendo, clientes que estão próximos uns dos outros, estar calendarizados para dias diferentes. O algoritmo CL é um algoritmo *k-medoids clustering* que divide as localizações dos clientes em *clusters*. Esta divisão é feita através da minimização do erro quadrado, *i.e.* da distância entre cada cliente de um determinado *cluster* e o ponto que representa o centro desse *cluster*. Este método é adequado para casos em que a matriz de distâncias é fornecida e o seu objetivo prende-se com a minimização do número de *clusters* a visitar no mesmo dia. Com isto, pretende-se que o máximo de clientes de um *cluster* sejam visitados no mesmo dia.

Definidos os clientes a visitar em cada dia, segue-se a resolução de um problema VRP para cada dia do período considerado. No estudo efetuado foi utilizada a *ILOG Dispatcher 4.4* (IBM, 2009a), uma biblioteca baseada no *ILOG Solver* (IBM, 2009b) e que oferece características adaptadas à solução de problemas VRP. A solução inicial foi obtida através do uso de uma heurística de poupanças, fazendo o *trade-off* entre o número de veículos utilizados e a distância percorrida. De seguida, a solução foi melhorada, através de uma *neighbourhood search*, quer intra-rotas, quer entre-rotas.

Na segunda abordagem a definição das rotas constituía o primeiro passo. Para tal, os autores utilizaram a mesma heurística de poupanças, determinando um número de grandes rotas onde todos os clientes e unidades de deposição de resíduos eram visitados. Posteriormente, e com base nessas rotas, a alocação dos clientes pelos dias foi feita através do algoritmo *k-medoids clustering*. Por fim, eram resolvidos os problemas VRP diários para o período considerado. Esta abordagem foi denominada pelos autores como algoritmo *Mega Route* (MR).

Para o caso em estudo, os autores concluíram que a aglomeração dos clientes em *clusters* resultava sempre numa solução melhor. Relativamente ao algoritmo MR, verificou-se que obtinha resultados significativamente piores que os outros dois (o algoritmo ES e o algoritmo CL), quando os clientes apresentavam uma frequência elevada de visitas, bem como uma grande dispersão geográfica. De referir ainda o desequilíbrio da carga de trabalho das rotas geradas.

Baptista *et al.* (2002) estudaram a recolha de papel reciclado em Portugal. O problema foi modelado como sendo um problema PVRP, tendo sido desenvolvida uma heurística para a sua solução. Esta heurística consistia na alocação inicial das tarefas de recolha pelos diversos dias, sendo feita posteriormente a melhoria dos resultados.

Nuortio *et al.* (2006) descreveram o problema de rotas de recolha de RSU na Finlândia Oriental como sendo um problema PVRP estocástico. A componente estocástica advém do facto de existir incerteza quanto aos tempos de viagem, procura por parte dos clientes, entre outros fatores incertos menos significativos.

A otimização das rotas é feita utilizando a meta-heurística GVNT desenvolvida por Kytöjoki *et al.* (2004). Este método integra sete heurísticas melhorativas, bem como meta-heurísticas. Entre as heurísticas melhorativas utilizadas podemos encontrar a 2-Opt (Flood, 1956) e a 3-Opt (Lin, 1965) e,

entre as meta-heurísticas estão englobadas a *guided local search* (Voudouris e Tsang, 1999) e a *variable neighbourhood search* (Mladenovic e Hansen, 1997).

Os autores discutiram ainda algumas técnicas para redução do tempo de computação e memória necessária. O objetivo por defeito consistia na minimização da distância percorrida pelos veículos, podendo, no entanto, ser utilizado o tempo total de recolha ou o custo.

O caso estudado por Wy *et al.* (2010) relaciona-se com a recolha de resíduos industriais. Nesse estudo, o serviço prestado aos clientes é a entrega e recolha de contentores de grandes dimensões para deposição de resíduos. Após a recolha do contentor cheio, o veículo descarrega os resíduos em local apropriado e deposita o contentor vazio num parque de armazenamento de contentores. Alternativamente pode entregar esse mesmo contentor noutra cliente. Pelas suas características este problema foi denominado problema *rollon-rolloff* VRP.

O problema em estudo pretendia minimizar o número de veículos necessários, bem como tempo total de viagem dos mesmos. Para o solucionar, os autores apresentaram um método de cálculo limitado inferiormente e propuseram um método heurístico iterativo. As rotas geradas foram, posteriormente, sujeitas a melhorias através de heurísticas melhorativas. Estes métodos foram testados utilizando dados reais de uma empresa norte-americana, tendo-se verificado na maioria dos casos uma melhoria dos resultados obtidos.

Makan *et al.* (2011) aplicaram o estudo do problema VRP à recolha de resíduos na cidade de Azemmour, Marrocos, na sequência da preocupação existente por parte dos governantes locais em distribuir efetivamente os veículos de recolha e respetivas tripulações pela região. O algoritmo utilizado era constituído por duas partes distintas: a primeira criava rotas de boa qualidade e a segunda melhorava-as através de *tabu search*.

O algoritmo para a criação de rotas é, também ele, composto por duas fases. Numa primeira fase pretende-se determinar qual o melhor ponto de inserção de um contentor que ainda não esteja alocado a uma rota. Este é determinado com recurso à minimização do custo obtido através do algoritmo das poupanças de Clarke e Wright (1962). A utilização deste algoritmo foi reportada pelos autores com sendo da máxima importância para a obtenção de rotas iniciais de boa qualidade, fator essencial para a posterior melhoria via *tabu search*. Numa segunda fase determina-se qual é o melhor contentor não alocado a uma rota e insere-se o mesmo no ponto de inserção determinado na fase anterior.

As rotas criadas pelo procedimento descrito anteriormente foram, posteriormente, sujeitas a uma melhoria via *tabu search*. A metodologia descrita foi implementada no *software Container Collector* para poder ser utilizada pelas autoridades locais. O seu objetivo prende-se com a solução de problemas VRP relativos à recolha de RSU, desde que o utilizador lhe forneça as respetivas características e informações necessárias.

Pela preocupação com fenómenos como o aquecimento global, o estudo feito por Kuo e Wang (2011) visava obter a redução de consumo de combustível, através da solução de um problema VRP. A obtenção das rotas propriamente dita foi feita através de *tabu search*.

Por forma a determinar o consumo total para uma determinada rota, os autores propuseram um modelo de cálculo que contabilizava a distância percorrida, a velocidade a que o transporte era

efetuado, bem como a quantidade de carga transportada. A velocidade de transporte foi definida em três categorias (alta, média ou baixa) e o consumo dos veículos foi obtido através do *Fuel Economy Guide* (US Department of Energy, 2008), documento fornecido pelo Departamento de Energia dos EUA. Dos resultados obtidos concluiu-se que as rotas geradas requeriam um menor consumo de combustível.

Em suma, pela sua facilidade no tratamento de problemas de grande dimensão, os métodos de resolução aproximada são frequentemente usados na solução de problemas VRP aplicados à recolha de resíduos. Nesta secção foram evidenciados inúmeros estudos que procuram solucionar este tipo de problemas. Em alguns casos foram utilizados algoritmos em simultâneo para obter melhores conjuntos de rotas finais (Kim *et al.*, 2006; Benjamin e Beasley, 2010; Nuortio *et al.*, 2006). De sublinhar a importância reportada por alguns autores na utilização de métodos como o de Clarke e Wright (1962) para a criação de rotas iniciais de boa qualidade (Makan *et al.*, 2011). Os objetivos principais dos estudos apresentados nesta secção foram a obtenção de rotas que minimizassem a duração da recolha (Kim *et al.*, 2006; Wy *et al.*, 2010), a distância percorrida (Nuortio *et al.*, 2006), o número de veículos utilizados (Kim *et al.*, 2006; Wy *et al.*, 2010), o consumo de combustível (Makan *et al.*, 2011), entre outros. Muitos dos métodos apresentados foram ainda implementados em ferramentas informáticas de apoio à decisão (*software WasteRoute* de Kim *et al.* (2006) e *Container Collector* de Makan *et al.* (2011)).

3.3.3 Estudos feitos com recurso a SIG

Por ser um *software* relativamente recente, ainda não existem muitos relatos na literatura da aplicação do *Network Analyst* à solução de problemas relacionados com a gestão de resíduos sólidos urbanos. No entanto, a popularidade da utilização desta ferramenta como auxiliar de cálculo tem vindo a aumentar durante os últimos anos (Karadimas *et al.*, 2007).

De entre as aplicações mais comuns, o estudo da localização de estações de gestão e deposição de resíduos, bem como recolha e transporte de RSU são as de maior destaque (Chalkias e Lasaridi, 2011). A localização de um aterro sanitário numa determinada área urbana é uma decisão que envolve considerações de ordem variada (económica, social, política, ambiental, sanitária, etc.). Por conseguinte, trata-se de uma decisão multicritério complexa, envolvendo inúmeros agentes e grupos de interesse público, que tem que cumprir a regulamentação em vigor existente e simultaneamente minimizar os diversos tipos de custos associados. Sumathi *et al.* (2008) procuraram responder a este problema recorrendo a uma análise de decisão multicritério, conjuntamente com SIG, no distrito de Pondicherry, Índia.

Não obstante o recurso a SIG para a solução de problemas relacionados com a localização de infraestruturas e transporte de resíduos, existem estudos onde estes sistemas são aplicados a outras áreas da gestão de resíduos urbanos. Exemplo disso é o estudo de Sharholy *et al.* (2007), constituído por três fases, e cujo objetivo se prendia com o levantamento das características quantitativas e qualitativas dos resíduos municipais gerados na cidade de Allahabad, Índia, bem como com a criação de mapas em SIG para a mesma. Na primeira fase, por forma a perceber quais as características dos resíduos gerados foram recolhidas amostras de diferentes locais. Na fase seguinte, com o objetivo de

quantificar os resíduos depositados bem como a disponibilidade dos contentores, frequência de recolha e satisfação com o serviço prestado, foi efetuado um inquérito que incidiu sobre 844 habitações selecionadas aleatoriamente, em diversas áreas da cidade. Por fim, na terceira fase, recorrendo ao *ArcGIS*, foram criados mapas utilizados como auxiliares na gestão dos resíduos sólidos urbanos.

Da análise efetuada aos resultados, os autores concluíram que um dos métodos recomendáveis para o tratamento dos resíduos seria a compostagem. Pelo rápido aumento dos RSU na área considerada e pela incapacidade dos sistemas de recolha em acompanhar esta evolução, os autores consideraram que no futuro poderão existir perigos associados à saúde pública.

No que respeita ao problema de recolha e transporte de RSU, Santos e Teixeira-Coutinho (2003) desenvolveram uma aplicação recorrendo aos SIG para a recolha de RSU. O objetivo pretendido era minimizar a distância total percorrida e o número de veículos envolvidos. Para tal, utilizaram o *ArcView* (ESRI, 2013) para visualização da configuração dos percursos criados. Foi implementada uma heurística na linguagem interna do SIG, baseando-se a escolha desta em fatores como o tempo e a qualidade dos resultados obtidos em testes anteriores. A aplicação foi validada com recurso a uma rede experimental correspondente à cidade de Coimbra, Portugal.

Ghose *et al.* (2006) desenvolveram um conjunto de medidas propostas para a gestão de RSU em ambiente SIG como forma de encontrar soluções viáveis. No modelo proposto pelos autores, procurou-se definir um plano para a armazenagem, recolha e deposição final dos resíduos para a cidade industrial de Asansol, Índia. As rotas de recolha dos veículos foram obtidas com recurso ao módulo *Network* do *ArcGIS*, por forma a minimizar a distância total percorrida.

Da mesma forma, Karadimas *et al.* (2007) utilizaram a extensão *Network Analyst*, com o objetivo de encontrar soluções de rotas eficientes para a recolha de RSU num bairro de Atenas, Grécia. Neste caso, e de maneira a simular corretamente o quotidiano, toda a informação relevante foi obtida através do Departamento Municipal encarregue da gestão dos resíduos sólidos urbanos em Atenas. Da solução obtida através do *Network Analyst* verificou-se uma poupança significativa face às práticas empíricas anteriores.

Zamorano *et al.* (2009) propuseram a aplicação de SIG para a determinação de um modelo de otimização para melhorar o processo de recolha de resíduos na cidade de Churriana de la Vega, Espanha. Neste foram englobadas características como o número de pontos de recolha e sua localização, bem como determinação de rotas de recolha mais curtas. O estudo foi feito em três fases: a primeira consistiu na criação de um mapa da cidade, usando o *Network Analyst*, na segunda foram otimizadas as localizações dos contentores; na terceira foi calculado o caminho de recolha mais curto. De forma análoga, também Chalkias e Lasiridi (2009) utilizaram um procedimento em três fases para a otimização da recolha de RSU no município de Nikea, Atenas. No entanto, a otimização de rotas feita na última etapa tinha como objetivo minimizar a distância, o tempo, o consumo de combustíveis e consequente emissão de gases poluentes.

A introdução de uma terceira dimensão no problema de otimização de rotas de recolha de RSU foi analisada por Tavares *et al.* (2009). Uma vez que a sua preocupação se prendia com a minimização do consumo de combustível, a introdução da inclinação das estradas tornou-se num

fator importante já que esta influencia o desempenho e a eficiência dos motores de combustão interna resultando na variação dos consumos. O modelo foi aplicado à cidade da Praia, Cabo Verde, e compreendia três fases: criação da rede de estradas em 3D, utilizando a extensão *ArcGIS 3D Analyst*; cálculo de consumo de combustível por segmento de estrada; otimização da recolha de RSU, tendo em conta o consumo de combustível, e aplicando o *Network Analyst*.

Não obstante ser um *software* recente, os estudos evidenciados nesta secção provam a potencialidade da utilização do *ArcGIS* na solução de problemas VRP aplicados à gestão de resíduos. As rotas seguidas pelos veículos de recolha foram calculadas com recurso aos módulos *Network Analyst* (Ghose *et al.*, 2006; Karadimas *et al.*, 2007; Zamorano *et al.*, 2009) e *3D Analyst* (Tavares *et al.*, 2009). Para além das duas dimensões usuais foi ainda feito um estudo onde estava incluída uma terceira dimensão – a inclinação das estradas (Tavares *et al.*, 2009). Os objetivos dos estudos efetuados prendiam-se com a minimização da distância percorrida no transporte e recolha de resíduos (Ghose *et al.*, 2006; Zamorano *et al.*, 2009; Chalkias e Lasiridi, 2009, Santos e Teixeira-Coutinho, 2003), do número de veículos utilizados (Santos e Teixeira-Coutinho, 2003) e do consumo de combustível (Chalkias e Lasiridi, 2009; Tavares *et al.*, 2009). Para além do planeamento das rotas de transporte e recolha foram evidenciadas outras aplicações dos SIG à gestão de resíduos sólidos urbanos, nomeadamente o estudo da localização de estações de gestão de resíduos sólidos urbanos (Sumathi *et al.*, 2008) e o levantamento das características quantitativas e qualitativas dos resíduos gerados numa determinada área para determinar a melhor prática conducente ao tratamento dos mesmos (Sharholy *et al.*, 2007).

3.3.4 Estudos feitos recorrendo a outro *software* comercial

A aplicação de outros tipos de *software* comercial na solução de problemas ligados à recolha e transporte de resíduos tem sido reportada na literatura. McLeod e Cherrett (2008) estudaram um problema relacionado com a recolha de resíduos no Reino Unido. O objetivo principal prendia-se com a avaliação da eficiência associada a diferentes estratégias de recolha. Para tal, foi utilizado o *software* comercial *LogiX* (DPS International, 2008), da empresa *DPS International*, e foi constatado que era possível obter uma poupança até 14% na distância percorrida pelos veículos.

Alagöz e Kocasoy (2008) desenvolveram um sistema de recolha e transporte de resíduos provenientes de infraestruturas ligadas à saúde, para a cidade de Istambul, Turquia. Por forma a solucionarem esse problema utilizaram o *software* *MapInfo* (Pitney Bowes Software, 2011) e *Roadnet* (Roadnet Technologies, Inc., 2012), tendo em consideração a localização dos hospitais, a quantidade de resíduos gerados, os tempos de carga e descarga e a capacidade dos veículos. Através do uso dos programas mencionados, foram criados cenários relacionados com o tipo de infraestrutura usada para a deposição dos resíduos. Da aplicação do novo sistema de planeamento de rotas obtido resultam reduções de custo significativas.

Estes dois exemplos representam a aplicação de *software* que está disponível para o cálculo de rotas de recolha e transporte de resíduos. Em ambos os casos resultaram rotas de recolha e transporte de resíduos mais eficientes. Em McLeod e Cherret (2008) a redução é feita na distância percorrida, e em Alagöz e Kocasoy (2008) a redução ocorre nos custos.

3.4 Contribuições potenciais do trabalho

Na revisão bibliográfica efetuada anteriormente foi evidenciada a importância da sustentabilidade ambiental das atividades ligadas à logística, particularmente quando estão envolvidos transportes de carga. No que diz respeito à gestão de RSU, o planeamento de rotas eficientes para a sua recolha e transporte é de extrema importância, devido ao elevado consumo de gasóleo, derivado do petróleo, e consequentes emissões poluentes. Foram apresentados e discutidos diversos métodos de resolução de problemas VRP aplicados à recolha e transporte de RSU. Os métodos de resolução exata, apesar de encontrarem a solução ótima, exibem a limitação de apenas conseguirem lidar com problemas de dimensão relativamente reduzida (número de nós igual a 100 para resolução em algumas horas num computador pessoal). Os métodos de resolução aproximada não têm esta limitação e, embora não obtenham a solução ótima, encontram soluções (sub-ótimas) que se aproximam desta. Essa será seguramente uma das razões que conduziu à intensificação do uso da abordagem que recorre aos SIG para planeamento de rotas de veículos de transporte de carga nos últimos anos, devido também à sua inerente capacidade em lidar com informação espacial complexa e pela abrangência da sua aplicabilidade a diversos problemas ligados à gestão de RSU, incluindo o planeamento de rotas.

Na literatura, a vasta maioria dos estudos existentes que efetuou o planeamento de rotas utilizou métodos de resolução aproximada ou recorreu à abordagem com utilização dos SIG. Tal facto advém da complexidade inerente aos sistemas de gestão de RSU, o que impede, na maioria dos casos, a aplicação de métodos de resolução exata. Apesar da importância destas duas abordagens, não foi encontrado na literatura nenhum estudo comparativo entre os resultados obtidos através do uso de ambas as supracitadas abordagens. Por conseguinte, esta dissertação analisará o estudo de caso da Amarsul (em particular o seu sistema de recolha e transporte de resíduos de vidro reciclável) na perspetiva do planeamento eficiente das suas rotas de recolha e transporte de resíduos recorrendo a SIG e a métodos de resolução aproximada. Os contributos desta análise encontram-se sumarizados nos parágrafos seguintes.

Primeiramente a análise focar-se-á na utilização de um SIG comercial, o *ArcGIS*. Objetivamente, pretendem-se obter dois conjuntos de rotas separados: um que minimize o tempo gasto na recolha e outro que minimize a distância percorrida. O *ArcGIS* utiliza a minimização da variável tempo como função objetivo para resolução do problema VRP (ESRI, 2016a). Como tal, a obtenção de rotas que minimizem a distância implicará estudar potenciais alterações ao sistema, ou à base de dados, que façam com que a minimização da distância percorrida passe a ser a função objetivo do problema VRP. Para além da funcionalidade que permite resolver um problema VRP e que recorre a um algoritmo baseado na meta-heurística *tabu search* (Glover, 1986), o *ArcGIS* tem uma outra funcionalidade que permite encontrar o caminho mais curto que passa por um conjunto de nós e que recorre ao algoritmo de Dijkstra (1959) (ESRI, 2016b). Tendo isto em conta, a presente dissertação também pretenderá analisar se os percursos gerados pela segunda funcionalidade (a que encontra o caminho mais curto) constituem rotas melhores que as rotas geradas pela primeira funcionalidade (*i.e.* com um menor valor da função objetivo), bem como aferir qual o grau de melhoria associado. Para além disto, será ainda verificada a exequibilidade da utilização desta segunda funcionalidade

diariamente, através da identificação do esforço necessário por parte do utilizador e do esforço computacional.

Um contributo desta dissertação de importância não despreciable é o desenvolvimento de raiz em Excel de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) recorrendo à linguagem *Visual Basic for Applications*. Neste será desenvolvida uma estrutura de base de dados que permita a sua reutilização em problemas VRP semelhantes de diferentes empresas e serão implementadas duas heurísticas: uma construtiva e outra melhorativa. A heurística construtiva escolhida é a de Clarke e Wright (1962), nomeadamente o algoritmo sequencial, para geração de um conjunto de rotas iniciais de boa qualidade. A heurística melhorativa escolhida é a 2-Opt (Flood, 1956). Pretende-se, assim, verificar qual a magnitude da melhoria associada à utilização da heurística 2-Opt (Flood, 1956) sobre as rotas geradas inicialmente pela heurística de Clarke e Wright (1962). Será ainda desenhada uma interface simples, intuitiva, que mitigue a possível inserção de erros fortuitos por parte do utilizador do SAD e que possibilite: i) resolver o problema VRP usando separadamente como função objetivo a minimização do tempo e a minimização da distância; ii) escolher o circuito para o qual queremos resolver o problema VRP; iii) escolher qual o tipo de veículo que será utilizado na recolha e transporte, ou se serão utilizados os dois tipos de veículos disponíveis. Com isto pretende-se que qualquer utilizador fique rapidamente apto a utilizar o SAD desenvolvido no planeamento diário de rotas.

Além disso, avança-se com uma metodologia de comparação dos resultados obtidos em cada uma das ferramentas recorrendo à identificação / criação de KPIs de medição da eficiência. Por fim, a comparação dos resultados gerados por ambas as ferramentas utilizadas – *ArcGIS* e SAD – permitirá aferir qual a melhor solução para o planeamento de rotas de transporte e recolha de resíduos do sistema da Amarsul.

4 Resolução do problema VRP da Amarsul

4.1 Objetivos para a determinação de rotas

Na secção 3.3 foram evidenciados alguns estudos do problema VRP aplicado à recolha de resíduos. Os principais objetivos considerados nesses estudos foram a minimização da distância percorrida (por exemplo: Santos e Teixeira-Coutinho, 2003; Nuortio *et al.*, 2006; Ghose *et al.*, 2006; Coene *et al.*, 2008; McLeod e Cherrett, 2008), a minimização do tempo despendido (por exemplo: Kim *et al.*, 2006; Wy *et al.*, 2010) e a minimização dos custos incorridos no processo de recolha (por exemplo: Kulcar, 1996; Komilis, 2008). Não obstante, a preocupação crescente com fatores ambientais fez com que alguns autores se focassem na minimização dos consumos de combustível associados ao processo de recolha. Exemplos disso são os estudos de Tavares *et al.* (2009), Zamorano *et al.* (2009) e Kuo e Wang (2011).

Tal como em alguns dos exemplos antes mencionados, nesta dissertação são minimizadas a distância percorrida pelos veículos e o tempo despendido durante o processo de recolha. Estes dois objetivos, que foram tratados em separado, deram origem a conjuntos de rotas distintas. Estes resultados serão analisados adiante no capítulo 5.

4.2 Abordagens de resolução

O problema associado à recolha de resíduos envolve o tratamento de informação espacial complexa. Para esse efeito, ferramentas computacionais como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm mostrado ser de grande utilidade (ver por exemplo, Ghose *et al.*, 2006; Karadimas *et al.*, 2007; Zamorano *et al.*, 2009; Tavares *et al.*, 2009). Na presente dissertação, numa primeira fase foi utilizado o *software ArcGIS* e respetiva extensão *Network Analyst* como meio de obter rotas de recolha segundo determinados critérios. O *ArcGIS* aborda o problema VRP através de um algoritmo baseado na meta-heurística *tabu search* (Glover, 1986). Através deste método, obtiveram-se dois conjuntos de rotas de recolha de resíduos de vidro: o primeiro minimizou o tempo gasto na viagem e o segundo minimizou a distância percorrida pelos veículos.

Numa segunda fase foi desenvolvido e utilizado um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) em *Excel*, recorrendo à linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA), denominado por *routePlanner*. Através do *routePlanner* foram determinados conjuntos de rotas para o problema de recolha de resíduos de vidro de acordo com os dois objetivos antes enunciados – minimização do tempo gasto e minimização da distância percorrida. Os conjuntos de rotas obtidos com esta ferramenta foram posteriormente comparados com os obtidos com o *ArcGIS*.

Na literatura existem diversos estudos em que a resolução de problemas VRP tem sido feita através da utilização de métodos exatos e métodos heurísticos (por exemplo: Komilis, 2008; Kim *et al.*, 2006; Makan *et al.*, 2011). O recurso a métodos exatos envolve, regra geral, poucas instâncias. Relembre-se que Iori *et al.* (2007) reportam que o número máximo de clientes para os quais uma variante ao problema VRP tinha sido resolvida por métodos exatos foi igual a 135. Devido à

complexidade da rede de ecopontos da Amarsul para a recolha de vidro, a utilização de heurísticas foi a via escolhida para implementação no SAD.

Uma das heurísticas introduzidas na aplicação foi o algoritmo sequencial das poupanças de Clarke e Wright (1962). Esta opção deveu-se à rapidez de execução e simplicidade de implementação desta heurística (Laporte, 2007). Referências recentes, em que foram aplicadas heurísticas construtivas (nomeadamente a de Clarke e Wright (1962)) para a construção de rotas iniciais de boa qualidade, são os estudos de Coene *et al.* (2008) e Makan *et al.* (2011). Também se integrou na ferramenta a heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956). Esta partiu das rotas obtidas através do algoritmo das poupanças de Clarke e Wright (1962) e aumentou a qualidade do resultado final. Exemplos em que também foram aplicadas heurísticas melhorativas são os estudos de Nuortio *et al.* (2006), de Coene *et al.* (2008) e de Wy *et al.* (2010).

As características e especificidades das duas ferramentas são exploradas neste capítulo.

4.2.1 Sistema de Informação Geográfica ArcGIS

Para a obtenção dos conjuntos de rotas em ambiente SIG foi utilizado o *software ArcGIS Desktop* que é a ferramenta mais utilizada pelos profissionais que trabalham com este tipo de sistemas. Para satisfazer as diferentes necessidades dos seus utilizadores estão disponíveis três tipos de licenças (ou níveis funcionais): a *ArcView*, a *ArcEditor* e a *ArcInfo*. A *ArcView* é a menos completa e foca-se no uso de dados para a construção de mapas e para a análise dos mesmos. A *ArcEditor* adiciona às funcionalidades da *ArcView* a possibilidade de editar a base de dados geográfica e a inserção de novos dados. A *ArcInfo* é a mais abrangente e inclui, para além das funcionalidades antes mencionadas, ferramentas complexas de geoprocessamento. No âmbito da presente dissertação foi utilizada a licença *ArcInfo* por ser a mais flexível e abrangente.

O *ArcGIS Desktop* é constituído por um conjunto de seis aplicações, entre elas a *ArcCatalog* e a *ArcMap*, utilizadas no âmbito da presente dissertação para o planeamento das rotas de recolha de resíduos. A *ArcCatalog* permite ao utilizador a organização e gestão de toda a informação geográfica (como mapas, globos, ficheiros de dados, bases de dados espaciais, entre outros) e é nesta aplicação que ocorre toda a manipulação da base de dados geográfica. A *ArcMap* é a aplicação principal e é utilizada para a execução de todas as tarefas de mapeamento e posterior edição dos mapas, bem como para a consulta e análise dos mesmos.

Existem ainda um conjunto de extensões que podem ser utilizadas para, por exemplo, fazer análises específicas. Entre elas temos a análise a redes de transporte, o cálculo do caminho mais curto que passa por dois pontos da rede, a análise tridimensional, entre outras. São exemplos destas extensões a *ArcGIS Network Analyst* e a *ArcGIS 3D Analyst*. Nesta dissertação foi usada a extensão *ArcGIS Network Analyst*, que permitiu determinar qual o caminho mais curto que passa por todos os ecopontos considerados e solucionar o problema VRP (ESRI, 2008).

4.2.1.1 Métodos de resolução do problema VRP usando o ArcGIS

Como referido anteriormente, a solução do problema de planeamento de rotas de veículos (problema VRP) da Amarsul utilizando o software ArcGIS foi obtida na aplicação ArcMap, recorrendo à extensão *Network Analyst*. Esta extensão inclui duas funcionalidades que podem ser usadas na criação de rotas: a “*New Vehicle Routing Problem*”, que encontra a solução para um problema VRP, e a “*New Route*”, que encontra o caminho mais curto que passa por um conjunto de nós.

A resolução de problemas VRP através da funcionalidade “*New Vehicle Routing Problem*”, que utiliza uma heurística *tabu search* (Glover, 1986), implica a inserção dos seguintes dados:

- Os ecopontos incluídos no circuito a planear;
- O(s) veículo(s) a utilizar e as respetivas características;
- O(s) ponto(s) de partida e de descarga disponíveis.

Para o problema VRP considerado foram considerados os veículos A e B (ver características na secção 2.2.2) para a recolha do conteúdo dos ecopontos, e a Amarsul como único ponto de partida e de descarga. Após a correta inserção dos referidos dados o programa procede à criação das rotas.

A identificação do caminho mais curto que passa por um conjunto de nós através da funcionalidade “*New Route*”, uma vez que tem por base o algoritmo de Dijkstra (1959), apenas necessita do conjunto de ecopontos a recolher e da respetiva sequência de recolha como *inputs*. Fornecidos estes dados é calculado o caminho mais curto que passa pelos referidos ecopontos de acordo com a sequência definida pelo utilizador. Não obstante, é permitida a redefinição da sequência de recolha dos ecopontos para encontrar uma sequência que minimize a variável desejada.

4.2.1.2 Limitação do ArcGIS na solução do problema VRP

Uma das limitações do ArcGIS é o facto da resolução do problema VRP apenas ser possível considerando a minimização da variável tempo (ESRI, 2016a). Para contornar esta limitação, na presente dissertação o planeamento por distância só foi possível através da alteração de alguns dos valores existentes na base de dados geográfica original. Em concreto, na tabela da base de dados onde está caracterizada a rede de estradas do Barreiro, a coluna correspondente ao tempo de percurso dos troços de estrada passou a conter as distâncias dos mesmos. Desta forma, o ArcGIS passou a utilizar a distância como variável a minimizar no planeamento das rotas de recolha.

A modificação à base de dados referida anteriormente não alterou o facto de, para o algoritmo interno do programa, as distâncias (que passaram a figurar na coluna do tempo) corresponderem a tempos. Assim sendo, sempre que um camião parava num contentor de ecoponto para recolher o conteúdo ou descarregava o conteúdo transportado na estação de tratamento, o ArcGIS somava os valores de tempo de serviço aos valores de distância percorrida até à altura. Relembre-se que a cada contentor de ecoponto corresponde um tempo de serviço de 4,5 minutos relacionado com a descarga do seu conteúdo para o camião de recolha e que a cada camião está associado um tempo de descarga do conteúdo na estação de tratamento igual a 10 minutos. Esta modificação à base de dados impossibilitou, assim, o cálculo correto do tempo total de cada rota, já que todos os tempos de

serviço (nomeadamente dos ecopontos e na Amarsul) passaram a ser incorretamente somados às distâncias. Para evitar este erro, no planeamento por distância foram descartados os tempos de serviço, passando o tempo de viagem a coincidir com o tempo total.

Uma das restrições do estudo de caso da Amarsul estabelece que o tempo total que um veículo pode percorrer é igual a 300 minutos correspondentes à duração de um turno de operação. No entanto, a contabilização dos tempos gastos por cada veículo deixou de poder ser feita, uma vez que o campo tempo passou a corresponder a distância. Como tal, o *ArcGIS* gerou rotas utilizando apenas o veículo B (o de maior capacidade), já que esta era a solução mais eficiente porque implicava um menor número de descargas do conteúdo transportado na estação de tratamento e, por conseguinte, uma menor distância percorrida em cada circuito. A exceção ocorreu para o circuito B onde a soma das distâncias associadas às rotas desse circuito foi superior a 300 km, o que para o *ArcGIS* correspondia a 300 minutos, e como tal excedia o tempo máximo de operação do veículo.

4.2.2 Sistema de Apoio à Decisão *routePlanner*

O conceito de Sistema de Apoio à Decisão (SAD) é bastante vasto e a sua definição depende do ponto de vista do autor. Na tentativa de generalizar este conceito, Druzdzel e Flynn (2002) propuseram a seguinte definição: SADs são

“sistemas informáticos interativos que auxiliam os seus utilizadores na tomada de decisões ou em atividades onde tenham de dar a sua opinião”.

Para além do planeamento e gestão de atividades empresariais, os SADs encontram aplicação em setores como o da saúde, o militar e outros onde se enfrentem situações em que seja necessária a tomada de decisões complexas.

Segundo Druzdzel e Flynn (2002) um SAD é constituído por três componentes fundamentais:

1. Uma base de dados;
2. Um modelo de transformação dos dados;
3. Uma interface intuitiva para o utilizador.

Na secção seguinte são explicadas as especificidades do SAD desenvolvido no âmbito da presente dissertação que se designou por *routePlanner*.

4.2.2.1 Especificidades do SAD desenvolvido para a resolução do problema VRP da Amarsul

No âmbito da presente dissertação, o desenvolvimento do SAD *routePlanner* teve como principal objetivo resolver o problema VRP da Amarsul minimizando a variável tempo gasto ou minimizando a variável distância percorrida. As rotas obtidas através do *routePlanner* serviram ainda de base de comparação às obtidas em ambiente SIG usando o *ArcGIS*.

Recuperando a noção de Druzdzel e Flynn (2002) acerca dos três componentes fundamentais de um SAD e no caso do sistema desenvolvido na presente dissertação:

1. A base de dados engloba os dados dos ecopontos e da estação de tratamento da Amarsul, bem como dos veículos utilizados pela empresa na recolha dos resíduos (ver características no capítulo 2 e respetivas secções);

2. O modelo de transformação dos dados é constituído pelas heurísticas de resolução do problema VRP, *i.e.* heurística de Clarke e Wright (1962) e heurística 2-Opt (Flood, 1956);
3. A interface intuitiva para o utilizador corresponde à interface de interação do utilizador com o SAD que poderá ser visualizada na secção 4.2.2.5.

Para integrar estes três componentes num sistema que pudesse ser facilmente utilizado para resolver problemas VRP recorreu-se ao *Microsoft Excel*, utilizando a linguagem de programação *Visual Basic for Applications*.

4.2.2.2 Opções de configuração do *routePlanner*

O *routePlanner* além de permitir planear rotas minimizando a distância percorrida ou o tempo gasto, possibilita o uso de apenas um dos veículos da Amarsul, dando ao utilizador a hipótese de escolha entre o veículo A e o veículo B, ou o uso de ambos os veículos em simultâneo. A necessidade de permitir o uso de apenas um veículo surgiu do facto do *ArcGIS*, para o planeamento das rotas minimizando a distância, recorrer apenas ao veículo B. Assim sendo, para o planeamento por distância, a correta comparação entre as rotas obtidas através do *routePlanner* e as rotas obtidas através do *ArcGIS* implica a utilização apenas do veículo B.

Outra das particularidades do SAD é o facto de ter duas heurísticas implementadas – uma heurística construtiva e outra melhorativa – e de possibilitar ao utilizador a resolução do problema VRP usando somente a primeira ou as duas. A heurística construtiva é a de Clarke e Wright (1962), nomeadamente o algoritmo sequencial desta heurística. Apesar de, por vezes, o algoritmo paralelo gerar rotas de melhor qualidade que o sequencial (*i.e.* em que a distância percorrida ou o tempo gasto são menores face ao algoritmo sequencial), não há evidência clara na literatura de que um deve ser usado em detrimento do outro. Desta forma, a escolha pelo algoritmo sequencial recaiu sobre o menor esforço computacional (*i.e.* menor tempo de processamento) que este requer (Lysgaard, 1997). Uma explicação genérica do funcionamento deste algoritmo é ilustrada pelo seguinte pseudocódigo:

1. Define-se a estação de tratamento da Amarsul como sendo o nó central (chame-se k a este nó, e defina-se $k = 0$);
2. Calculam-se as poupanças através da fórmula $s_{ij} = c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$, onde $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, $i \neq j$, sendo que i e j representam os ecopontos do sistema da Amarsul;
3. Cria-se uma lista organizada por ordem decrescente das poupanças;
4. Começando com o par de nós correspondente à maior poupança, realizam-se os seguintes passos:
 - a. Adiciona-se o arco que liga os nós i e j à rota, se desta ligação resultar uma rota que não viole nenhuma das restrições do problema; caso contrário rejeita-se a ligação;
 - b. Tenta-se adicionar o arco seguinte à rota, da lista ordenada de poupanças, e repete-se o passo (a).

O algoritmo não quebra nenhuma das ligações formadas anteriormente.

O algoritmo termina quando todos os nós estiverem incluídos na rota.

Posteriormente à obtenção das rotas iniciais através da heurística construtiva, foi aplicada a heurística melhorativa 2-Opt, com o objetivo de obter melhores rotas finais, *i.e.* onde a distância percorrida ou o tempo gasto eram menores. Uma explicação genérica do funcionamento deste algoritmo é ilustrada pelo seguinte pseudocódigo:

1. Parte-se de uma rota inicial (obtida, nesta dissertação, através do algoritmo sequencial de Clarke e Wright (1962));
2. Seleciona-se, aleatoriamente, um arco dessa rota;
3. Faz-se um movimento 2-Opt com todos os outros arcos dessa rota, *i.e.* eliminam-se os dois arcos (*i.e.* o arco selecionado aleatoriamente e o arco com o qual se está a fazer o movimento 2-Opt) e ligam-se as duas cadeias resultantes da outra forma possível, escolhendo-se a melhor das rotas obtidas;
4. Se a rota obtida for melhor que a rota atual, esta torna-se a rota atual e o algoritmo volta para o ponto 2; caso contrário, o algoritmo termina pois foi encontrado um ótimo local.

4.2.2.3 Limitações do *routePlanner*

Para o cálculo dos conjuntos de rotas iniciais, *i.e.* os conjuntos de rotas obtidos através da aplicação da heurística de Clarke e Wright (1962), são necessárias as distâncias (ou custos ou tempos) entre cada dois ecopontos da rede. Para esse efeito é necessário obter matrizes origem-destino (OD) com essa informação.

Como não existiam matrizes OD para a rede de ecopontos da Amarsul, recorreu-se ao *ArcGIS* para a criação automática destas matrizes. Concretamente, o *ArcGIS* utiliza o algoritmo do caminho mais curto de Dijkstra (1959) para determinar a menor distância / tempo entre cada par de ecopontos da rede da Amarsul. No entanto, ao criar a matriz OD que contém as distâncias, o *ArcGIS* não possibilita a criação da matriz OD com os tempos correspondentes a essas distâncias, e vice-versa. Denominem-se estas matrizes (*i.e.* as matrizes com os tempos) por matrizes complementares. Não sendo possível a obtenção de matrizes complementares, o cálculo do tempo gasto quando se faz o planeamento minimizando a distância, e da distância percorrida quando se faz o planeamento minimizando o tempo, torna-se difícil. Para resolver esta situação recorreu-se ao cálculo das velocidades médias associadas a cada circuito, que foram posteriormente utilizadas para efetuar as conversões de distância em tempo e vice-versa. Este cálculo foi feito com recurso ao *ArcGIS* através da resolução de um problema VRP para cada um dos circuitos, utilizando cada um dos veículos em separado (*i.e.* solucionou-se um problema VRP para o circuito x , onde $x \in \{A, B, C, D, E\}$, utilizando o veículo A e outro para o mesmo circuito utilizando o veículo B). Da distância percorrida e do respetivo tempo gasto na recolha em cada circuito e utilizando cada veículo, calcularam-se os valores da velocidade média associada a cada veículo para cada circuito.

4.2.2.4 Aplicabilidade do *routePlanner* a outras empresas com problemas VRP semelhantes

Uma das preocupações prévias à criação do SAD *routePlanner* foi a possibilidade de este ser aplicado a outras empresas com problemas semelhantes. Este princípio esteve presente desde a escolha da linguagem de programação utilizada, até ao desenho da interface com o utilizador.

A linguagem *Visual Basic for Applications*, pelo facto de se suportar numa plataforma existente na maioria das empresas (o *software Microsoft Excel*), foi escolhida para programar o *routePlanner*. Adicionalmente, pelo facto de ser uma linguagem simples e intuitiva, a compreensão do código por outros programadores torna-se mais rápida, agilizando o processo de adaptação do programa a outras empresas, caso seja necessário.

A estrutura base de dados que suporta o sistema também foi pensada com o objetivo de poder ser aplicada a problemas semelhantes ao da Amarsul. Ainda assim, a adaptação do *routePlanner* a outros problemas pode envolver algumas alterações ao código do programa. Por exemplo, para o caso da Amarsul, a base de dados é composta por cinco folhas de cálculo, uma para cada um dos cinco circuitos da empresa (nomeadamente A, B, C, D ou E). O código de programação do SAD foi desenvolvido para que este, quando se pretendem planear as rotas de um determinado circuito, utilize os dados que se encontram na folha de cálculo referente a esse mesmo circuito (*i.e.* com a mesma denominação desse circuito). Desta forma, a aplicação do SAD a outros problemas poderá envolver alterações à nomenclatura utilizada na denominação das folhas de cálculo, bem como às partes do código em que se carregam os dados para memória. Em cada uma das folhas de cálculo estão agrupados os seguintes conjuntos de dados:

- Matriz origem-destino (OD) com as distâncias entre cada par de ecopontos;
- Matriz origem-destino (OD) com os tempos entre cada par de ecopontos;
- Tabela com a informação sobre o enchimento de cada um dos ecopontos.

A disposição destes conjuntos de dados em cada folha de cálculo está esquematizada na Figura 4.1, onde n é o número de ecopontos incluídos no circuito. Para o correto funcionamento do SAD na resolução de outros problemas VRP torna-se obrigatório seguir o mesmo esquema para a construção da base de dados.

	1	2	(...)	n	n+1	n+2	n+3	n+4
1	Título				Tabela com os dados de volume de enchimento dos ecopontos			
2								
3	Matrix OD – Distâncias							
(...)								
n+4								
n+6	Título							
n+8	Matrix OD – Tempo							
(...)								
n+n								

Figura 4.1 – Estrutura da base de dados de um circuito da Amarsul, que inclui as matrizes OD de distâncias e tempos e os volumes de enchimento de cada ecoponto

Para além das distâncias entre cada par de ecopontos e dos volumes de enchimento de cada ecoponto foram adicionadas ao *routePlanner* outras características dos veículos e dos circuitos. Concretamente, numa folha de cálculo auxiliar denominada por “Dados_Ecopontos&Veiculos”, foi incluída a seguinte informação:

- Capacidade máxima de cada um dos veículos de recolha;
- Tempo máximo de turno de operação de cada veículo;
- Velocidade média de cada veículo para cada um dos circuitos da Amarsul.

A aplicação do SAD a outros problemas VRP requer também a alteração desta folha para espelhar as características desses mesmos problemas.

4.2.2.5 Utilização do *routePlanner* e mitigação de erros inseridos pelo utilizador

A interface de utilização do SAD foi concebida para garantir a robustez do sistema e para ser de fácil e rápida utilização. Foram, assim, analisados os possíveis pontos de contacto entre o utilizador e o sistema e desenvolvidas medidas que mitigassem possíveis erros causados pelo utilizador (quer através da inserção de dados incorretos, quer através de instruções erradas dadas pelo utilizador ao sistema). A preservação dos dados contidos na base de dados foi assegurada através da protecção de cada folha de cálculo com uma palavra-chave. De seguida apresentam-se o processo de utilização do SAD e os respetivos pontos de contacto entre o utilizador e o sistema, desde que o sistema é inicializado até ao momento em que resolve o problema VRP e apresenta as rotas de recolha de

resíduos de vidro reciclável da Amarsul. Nesta secção também são ilustradas as medidas desenvolvidas para mitigar possíveis erros inseridos pelo utilizador.

Quando o *routePlanner* é iniciado é apresentado o ecrã inicial representado na Figura 4.2. Neste ecrã o utilizador deverá configurar quatro campos para que o sistema resolva o problema VRP da Amarsul e apresente as respetivas rotas de recolha de resíduos. Os quatro campos são os seguintes:

- “Circuito a planear” – qual o circuito para o qual se pretende fazer o planeamento das rotas de recolha (circuitos A a E efetuados pela Amarsul);
- “Planeamento por” – qual o objetivo desse planeamento (minimização da distância percorrida ou do tempo gasto na recolha);
- “Veículo(s) a usar” – qual o(s) veículo(s) utilizados na recolha (veículo A, B ou ambos);
- “Melhorar rotas” – caso se pretender efetuar uma melhoria das rotas obtidas inicialmente.

A interação do utilizador com o sistema foi limitada no que diz respeito ao preenchimento dos campos correspondentes às opções a selecionar. Esta limitação, que tem como objetivo prevenir que o utilizador introduza opções inexistentes (por exemplo, um erro de escrita, na altura de escolher uma opção de planeamento, representaria uma opção inexistente e, por conseguinte, não reconhecida pelo sistema) foi conseguida através do uso de listas “drop-down”, que apenas permitem ao utilizador selecionar as opções reconhecidas pelo *routePlanner*. Para proteger a integridade dos dados de suporte ao sistema, as folhas onde estes dados estão incluídos foram protegidas através do uso de uma palavra-passe. Isto impede que um utilizador sem permissão possa efetuar modificações dos dados.

Após a seleção das opções descritas, o utilizador deve premir o botão “Planear rotas” para dar início à execução do programa. Note-se que, caso a opção “Melhorar rotas” não seja selecionada, o planeamento é feito utilizando a heurística construtiva de Clarke e Wright (1962); caso contrário é aplicada a heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956), às rotas obtidas primeiramente pela heurística de Clarke e Wright (1962).

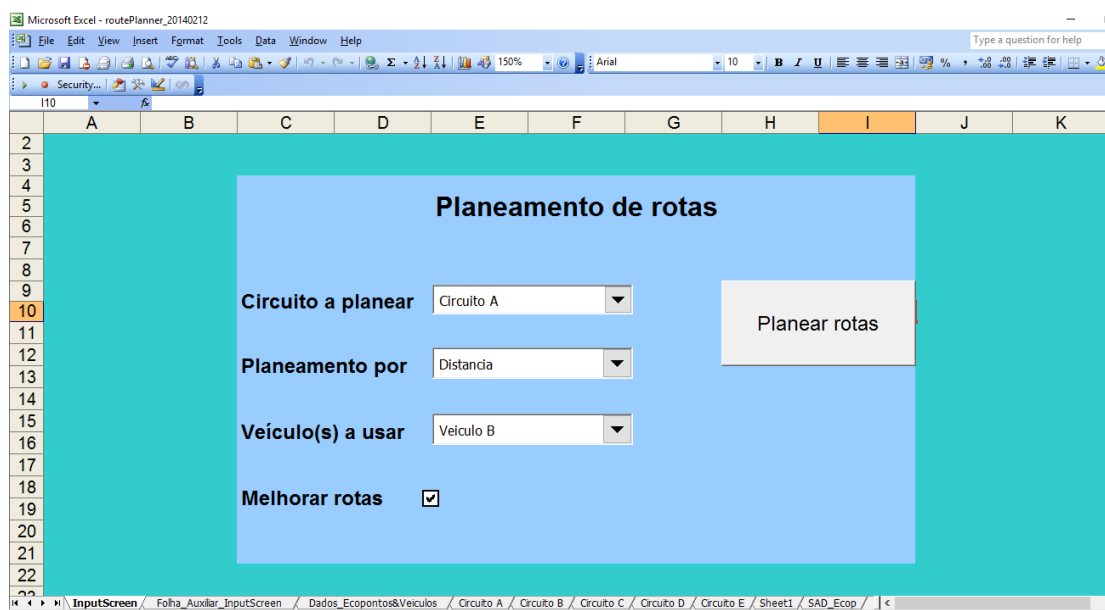


Figura 4.2 – Ecrã inicial do *routePlanner*

Ao ser iniciado o planeamento das rotas de recolha é apresentada uma folha denominada “Results”. Enquanto estiver a decorrer o cálculo das rotas, esta folha apresenta no topo a frase “**Planeamento de rotas em progresso, por favor aguarde...**”. Para além disto, a folha contém ainda informação sobre qual o circuito para o qual está a ser feito o planeamento das rotas de recolha (“**Circuito planeado:**”), qual o objetivo deste planeamento (“**Planeamento por:**”) e qual ou quais os veículos usados para efetuar a recolha (“**Veículo(s) usado(s):**”). Esta folha pode ser visualizada através da Figura 4.3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Planeamento de rotas em progresso, por favor aguarde...											
2												
3												
4	Circuito planeado:	Circuito A										
5	Planeamento por:	Distancia										
6	Veiculo(s) usado(s):	Veiculo B										
7	Distancia total:		km									
8	Tempo total:		min									
9												
10	Rotas obtidas:											
11												

Figura 4.3 – Ecrã apresentado durante o cálculo das rotas de recolha

Findo o cálculo das rotas de recolha a folha “Results” é atualizada, diferindo o seu aspeto consoante se utilizem um ou os dois veículos no planeamento. Para o caso em que se utiliza apenas um veículo na recolha dos resíduos (ver Figura 4.4), a frase que aparece no topo é modificada para “**Planeamento de rotas por [Objetivo do planeamento] para o [Circuito planeado], usando o [Veículo usado]**”, consoante o objetivo do planeamento, circuito planeado e veículo usado. As células referentes à distância total e tempo total são preenchidas com os valores obtidos através do planeamento efetuado e são apresentadas as rotas de recolha calculadas com a seguinte informação:

1. Sequência de recolha dos ecopontos do circuito;
2. Capacidade preenchida do veículo à medida que são recolhidos os ecopontos;
3. Distância percorrida ou o tempo despendido, consoante o objetivo do planeamento determinado pelo utilizador.

Microsoft Excel - routePlanner_20140212

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

Security...

A1 Planejamento de rotas por Distancia para o Circuito D, usando o Veiculo B

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Planeamento de rotas por Distancia para o Circuito D, usando o Veiculo B									
2										
3										
4	Circuito planeado:	Circuito D								
5	Planeamento por:	Distancia								
6	Veiculo(s) usado(s):	Veiculo B								
7	Distancia total:	94,441 km								
8	Tempo total:	183,44 min								
9										
10	Rotas obtidas:									
11										
12	Rota	Amarsul	39	38	44	Amarsul				
13	Capacidade preenchida		1,2215	1,4686	2,85201					
14	Distancia		3799,769	4161,592	5167,235	10100,49				
15	Rota	Amarsul	55	36	35	50	53	34	33	41
16	Capacidade preenchida		0,0581	0,9387	1,3853	1,8984	2,2659	2,9666	3,6302	4,9644
17	Distancia		5576,404	9915,879	10493,41	10804,7	11488,78	12415,89	12644,76	12958,38

Figura 4.4 – Ecrã de apresentação das rotas de recolha usando apenas um veículo

Para o caso em que se utilizam os dois veículos na recolha dos resíduos (ver Figura 4.5), a frase que aparece no topo é modificada para “**Planeamento de rotas por [Objetivo do planeamento] para o [Circuito planeado], usando Ambos os veículos**”, consoante o objetivo do planeamento e o circuito planeado. São preenchidas as células referentes à distância total e tempo total com os valores obtidos através do planeamento efetuado e as células de distâncias percorridas e tempos despendidos por cada um dos veículos utilizados. São apresentadas também as rotas de recolha calculadas com a seguinte informação:

1. Veículo que recolheu os ecopontos na referida rota;
2. Sequência de recolha dos ecopontos do circuito,
3. Capacidade preenchida do veículo à medida que são recolhidos os ecopontos;
4. Distância percorrida ou o tempo despendido, consoante o objetivo do planeamento determinado pelo utilizador.

Microsoft Excel - routePlanner_20140212

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

Security...

Planeamento de rotas por Distancia para o Circuito D, usando Ambos os veiculos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Planeamento de rotas por Distancia para o Circuito D, usando Ambos os veiculos												
2													
3													
4	Circuito planeado:	Circuito D											
5	Planeamento por:	Distancia											
6	Veiculo(s) usado(s):	Ambos											
7	Distancia total:	104,895 km											
8	Veiculo A:	49,698 km											
9	Veiculo B:	55,197 km											
10	Tempo total:	201,76 min											
11	Veiculo A:	94,54 min											
12	Veiculo B:	107,21 min											
13													
14	Rotas obtidas:												
15													
16	Rota Veiculo A	Amarsul	39	44	55	38	36	35	50	53	34	66	Amarsul
17	Capacidade preenchida		1,2215	2,60491	2,66301	2,91011	3,79071	4,23731	4,75041	5,11791	5,81861	6,56621	
18	Distancia		3799,769	5067,935	6713,574	8227,686	11053,05	11630,58	11941,87	12625,95	13553,06	15143,63	22901,77
19	Rota Veiculo B	Amarsul	33	41	32	31	30	45	46	26	58	59	37
20	Capacidade preenchida		0,6636	1,9978	2,3821	2,765	3,871	4,8608	5,4922	6,3021	7,3731	7,8582	8,0647
21	Distancia		7568,633	7882,252	8274,92	8537,484	8703,32	9695,706	9807,48	11648,77	12078,6	13187,66	13426,05

Figura 4.5 – Ecrã de apresentação das rotas de recolha usando ambos os veículos

O *routePlanner*, tal como apresentado anteriormente, constitui uma ferramenta de simples e fácil utilização que traz ganhos de eficiência através da redução do custo associado a serviços de recolha e transporte de conteúdo. Apesar de ter sido desenvolvido especificamente para solucionar o problema VRP associado à recolha e transporte de resíduos de vidro reciclável da Amarsul, a sua adaptação a outras empresas com problemas VRP semelhantes implica apenas que a base de dados siga a estrutura apresentada. Para além disto, mesmo para empresas que utilizem sistemas de planeamento mais complexos (como são o caso os SIG), o *routePlanner* pode ter aplicabilidade pelo cálculo de rotas que sirvam de comparação com as obtidas através desses sistemas e que possam ser utilizadas no caso de serem mais eficientes.

5 Resultados

5.1 Introdução

O presente trabalho tem como objetivo resolver o problema VRP da Amarsul associado à recolha de resíduos de vidro reciclável através da utilização de duas ferramentas distintas e comparar as rotas geradas por ambas. Para se perceber se as conclusões retiradas são extrapoláveis para a realidade de outras empresas (com problemas VRP associados a circuitos diferentes) esta secção começa por analisar se os circuitos de recolha da Amarsul são representativos de diferentes realidades. Após esta análise é introduzida a metodologia de comparação dos resultados entre as duas ferramentas, nomeadamente a comparação direta entre os valores obtidos para as funções objetivo e o cálculo e comparação de um conjunto de indicadores de eficiência. Terminada esta introdução são apresentados e comparados os resultados obtidos através das duas ferramentas.

5.2 Representatividade dos circuitos da Amarsul

O planeamento das rotas de recolha de resíduos de vidro reciclável da Amarsul teve como objetivos a minimização da distância percorrida ou a minimização do tempo gasto na recolha dos resíduos depositados em ecopontos, nos cinco circuitos efetuados pela empresa. Previamente ao cálculo das rotas foi verificado se os circuitos eram representativos dos diferentes tipos de situação que se podem encontrar em ambiente real. Sendo a comparação entre as duas ferramentas um objetivo da presente dissertação, a representatividade da amostra onde estas são aplicadas é importante para que seja viável extrapolar as conclusões obtidas para outros problemas VRP com outros circuitos associados.

A representatividade dos circuitos foi aferida através da análise da dispersão geográfica dos ecopontos. Desta análise concluiu-se que havia circuitos predominantemente urbanos, *i.e.* onde os ecopontos estavam mais concentrados em áreas urbanas, e circuitos extra-urbanos ou rurais, *i.e.* onde os ecopontos estavam mais dispersos entre si. As principais características rodoviárias destes circuitos podem ser sumarizadas da seguinte forma:

- A circuitos urbanos estão associadas características rodoviárias como uma menor velocidade máxima permitida e uma maior concentração de trânsito e outros obstáculos nas vias;
- A circuitos extra-urbanos ou rurais estão associadas características como uma menor concentração de trânsito ou outros obstáculos nas vias e uma velocidade máxima permitida superior.

Em concreto relativamente aos cinco circuitos da Amarsul, por inspeção visual e utilizando como critério a concentração dos contentores de ecoponto em zonas de maior densidade populacional (zonas predominantemente preenchidas com a cor cinza), podem considerar-se:

- Os circuitos A, B e C como sendo mais urbanos (ver Figura 5.1);
- Os circuitos D e E como sendo mais extra-urbanos ou rurais (ver Figura 5.2).

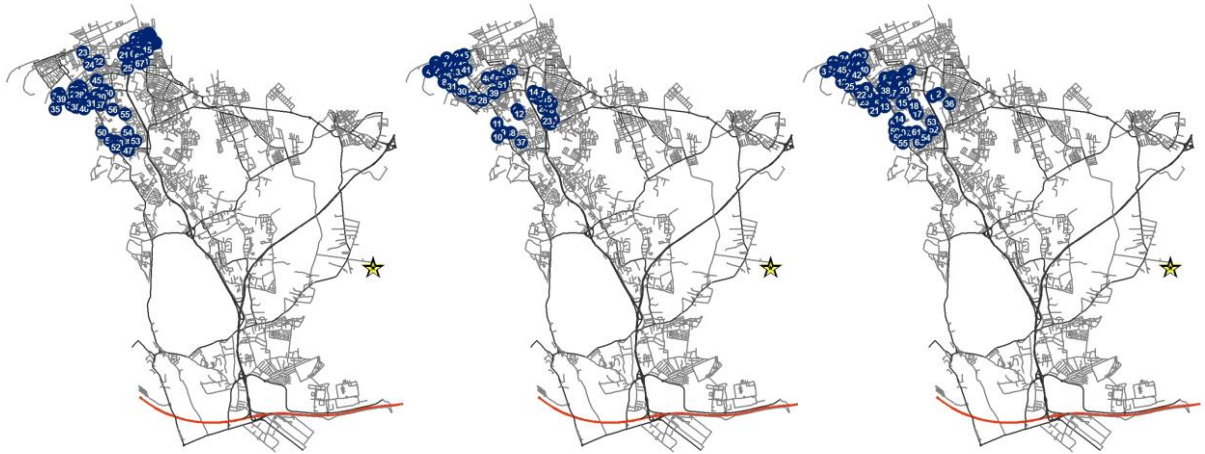


Figura 5.1 – Dispersão geográfica dos ecopontos dos circuitos A (esquerda), B (centro) e C (direita)

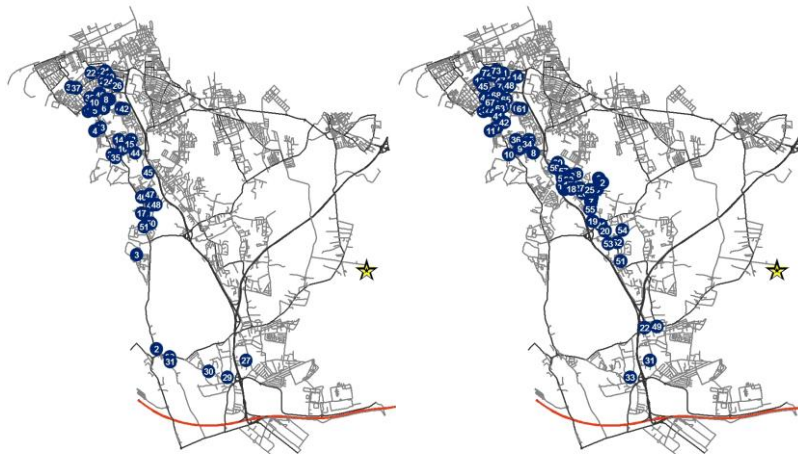


Figura 5.2 – Dispersão geográfica dos ecopontos dos circuitos D (esquerda) e E (direita)

Tendo em conta que os veículos de recolha e transporte da Amarsul operam em circuitos urbanos e em circuitos extra-urbanos ou rurais, podemos concluir que as duas ferramentas utilizadas para resolver o problema VRP (nomeadamente, o *ArcGIS* e o *routePlanner*) foram testadas nos diferentes tipos de circuitos que podem ser encontrados em problemas reais.

5.3 Metodologia de análise e comparação dos resultados

Para a análise e comparação dos resultados obtidos através do *ArcGIS* e do *routePlanner* foram definidos um conjunto de indicadores que serão calculados para cada um dos circuitos e respetivas rotas. A comparação entre rotas será feita com base na melhoria verificada em termos dos valores da função objetivo (indicador denominado por “Melhoria Verificada”), no volume preenchido do veículo anterior à descarga (indicador denominado por “Volume Preenchido”) e na distribuição da carga de trabalho pelos veículos, quer em termos de ecopontos servidos (indicador denominado por

“Ecopontos Servidos”), quer em termos de distância percorrida / tempo gasto (indicador denominado por “Distribuição da Carga”). Com isto, para além de se estarem a comparar diretamente os valores das funções objetivo, estão ainda a comparar-se a eficiência de utilização dos veículos de recolha e respetivas capacidades de transporte. O cálculo de cada um dos indicadores acima referidos é feito através das seguintes equações:

a) Melhoria Verificada (MV)

$$MV = \left[1 - \frac{\text{valor da função objetivo obtido com o método } x}{\text{valor da função objetivo obtido com o método } y} \right] \times 100, \text{ com } x \neq y, \quad (21)$$

onde $x, y \in \{\text{“New VRP”}, \text{“New Route”}, \text{Clarke e Wright}, \text{2-Opt}\}$

Unidade: %;

Nota: Quando MV é menor que zero verifica-se que o método x obteve um resultado pior que o método y ; quando MV é maior que zero o método x teve melhor resultado que o do método y ; e quando MV é igual a zero ambos os métodos obtiveram o mesmo resultado.

b) Volume Preenchido (VP)

$$VP = \left[\frac{\text{volume preenchido do Veículo } z \text{ antes da descarga na estação de tratamento}}{\text{volume máximo de resíduos que podem ser transportados no Veículo } z} \right] \times 100 \quad (22)$$

onde, $z \in \{A, B\}$

Unidade: %.

Nota: o cálculo do volume preenchido baseia-se na equação (22). Para cada um dos circuitos, esta equação é aplicada a cada uma das rotas de cada um dos veículos, resultando daqui um conjunto de valores de VP . Posteriormente é calculado um valor de VP médio, por circuito e por veículo, sendo este o valor apresentado nas tabelas das análises efetuadas nas secções 5.4, 5.5 e 5.6.

c) Ecopontos Servidos (ES)

$$ES = \text{n}^\circ \text{ de ecopontos servidos pelo Veículo } z \quad (23)$$

onde, $z \in \{A, B\}$

Unidade: número de ecopontos.

d) Distribuição da Carga (*DC*)

$$DC = \left[\frac{\text{valor da variável minimizada utilizando Veículo } z}{\text{valor total da variável minimizada incluindo ambos os veículos}} \right] \times 100 \quad (24)$$

onde, $z \in \{A, B\}$

Unidade: %.

Inicialmente são apresentados e analisados os valores obtidos através do *ArcGIS* e, posteriormente, é adotado o mesmo procedimento para os valores calculados pelo *routePlanner*. Por fim, são comparadas as duas abordagens. Em cada uma das secções que se seguem (secções 5.4, 5.5 e 5.6) para além dos valores das variáveis minimizadas, a análise será suportada pelo cálculo dos indicadores apresentados anteriormente nesta secção.

5.4 Resultados obtidos através do *ArcGIS*

Conforme referido na secção 4.2.1 o *ArcGIS* recorre à extensão *Network Analyst* do *ArcMap* para resolver o problema VRP. Para tal utiliza-se a funcionalidade “*New Vehicle Routing Problem*” (“*New VRP*”), que utiliza a meta-heurística *tabu search* (Glover, 1986) para a construção das rotas, e insere-se o conjunto de ecopontos que fazem parte do circuito, o conjunto de veículos que constitui a frota e o conjunto de pontos de descarga. Através desta abordagem foram criadas as rotas para cada um dos circuitos da Amarsul.

Quando se compararam inicialmente as rotas obtidas pelo *ArcGIS* com as rotas obtidas pelo *routePlanner* verificou-se que em alguns casos as rotas geradas pelo *ArcGIS* eram de pior qualidade (*i.e.* apresentavam valores mais elevados das variáveis minimizadas). Adicionalmente, quando se fez o planeamento por distância o *ArcGIS* apenas utilizou um dos veículos disponíveis (ver explicação na secção 4.2.1.2), o que reforçou a necessidade de testar a qualidade das rotas obtidas. O teste foi feito com recurso à funcionalidade “*New Route*”, que utiliza o algoritmo de Dijkstra (1959) para encontrar o caminho mais curto que passa por um conjunto de nós. Para tal inseriram-se as sequências de ecopontos obtidas inicialmente para cada rota de cada circuito (através da funcionalidade “*New VRP*”) e permitiu-se que o algoritmo as alterasse, desde que dessa alteração resultassem rotas mais curtas. Veja-se que esta alteração não infringia nenhuma restrição de capacidade, uma vez que não eram adicionados ecopontos a nenhuma rota.

Nas secções 5.4.1 e 0 são apresentados e comparados os resultados obtidos através da funcionalidade “*New VRP*” e os resultados obtidos através da funcionalidade “*New Route*”. Os valores do indicador “Melhoria Verificada” (*MV*) (ver equação (21)) são calculados como meio de comparação entre as duas funcionalidades, sendo utilizados no numerador os valores provenientes da funcionalidade “*New Route*” e no denominador os valores da funcionalidade “*New VRP*”. Para o cálculo dos restantes indicadores (nomeadamente “Volume Preenchido” (*VP*), “Ecopontos Servidos” (*ES*) e “Distribuição da Carga” (*DC*), ver equações 22, 23 e 24, respetivamente) foram utilizados os valores da função objetivo das rotas planeadas com recurso à funcionalidade “*New VRP*”. Esta

escolha tem como fundamento o facto da funcionalidade “*New Route*” envolver um aumento considerável do esforço associado à inserção de dados no programa por parte do utilizador. Relembre-se que, para utilizar a funcionalidade “*New Route*”, o utilizador tem de:

1. Resolver inicialmente o problema VRP através da funcionalidade “*New VRP*” e obter um conjunto de rotas para cada circuito (*i.e.* os ecopontos e as respetivas sequências de recolha);
2. Introduzir manualmente os dados relativos às rotas de cada circuito (*i.e.* os ecopontos e as respetivas sequências de recolha) na funcionalidade “*New Route*”.

Para além do fator tempo, a *MV* média verificada para o uso da funcionalidade “*New Route*” não é significativa, pelo que se considerou que o utilizador optará com maior frequência pela utilização da funcionalidade “*New VRP*”.

Para o planeamento por distância, uma vez que o *ArcGIS* apenas recorreu ao veículo B para recolher o conteúdo dos ecopontos, os indicadores de distribuição de trabalho entre veículos (*i.e.* *ES* e *DC*) não foram calculados. No entanto, foi calculado o indicador *VP*, uma vez que este continua a ser relevante para se aferir a eficiência no uso da capacidade do veículo de recolha.

Para o planeamento por tempo, por se utilizarem ambos os veículos na recolha, foram calculados todos os indicadores mencionados para ser feita uma análise completa aos resultados obtidos.

Para ambos os planeamentos, e tendo em conta que o *ArcGIS* apresenta os resultados também sob a forma de um mapa digital, utilizar-se-ão ainda os mapas com as rotas de alguns dos circuitos da Amarsul para complementar a apresentação dos resultados obtidos. Os circuitos para os quais serão apresentados os mapas são aqueles em que a opção “*New Route*” gerou melhores resultados que a “*New VRP*”, evidenciando-se as diferenças através da utilização de diferentes cores.

5.4.1 Planeamento minimizando a variável tempo

Os valores apresentados na Tabela 5.1 mostram que a funcionalidade “*New Route*” melhorou em três dos cinco circuitos as rotas geradas pela funcionalidade “*New VRP*”. No caso do circuito E a melhoria representou uma poupança de aproximadamente 4 minutos, que corresponde a cerca de 3%. Surge aqui uma primeira confirmação de que as rotas geradas pelo algoritmo de base à funcionalidade “*New VRP*” (funcionalidade cujo objetivo é resolver problemas de planeamento de rotas de veículos) apresentam um potencial de melhoria que pode ser obtido através do rearranjo das sequências de recolha. No entanto, o aumento na complexidade deste processo de melhoria de rotas associado aos valores pouco significativos de melhoria verificados, tornam a sua utilização pouco viável para a solução de problemas do dia-a-dia. Ainda assim, é de referir que através de um algoritmo simples, como é o caso do algoritmo do caminho mais curto de Dijkstra (1959), se conseguiram melhorar os valores obtidos através de um algoritmo mais complexo (*i.e.* baseado na meta-heurística *tabu search* (Glover, 1986)).

Tabela 5.1 – Resultados do planeamento por tempo utilizando as funcionalidades “New VRP” e “New Route” do ArcGIS e cálculo do indicador MV

Circuito	Funcionalidade utilizada		MV [%]	Número de Rotas	
	“New VRP”	“New Route”		Veículo A	Veículo B
	Tempo [min]	Tempo [min]			
A	156,81	156,19	0,40%	2	2
B	194,31	194,87	-0,29%	3	2
C	152,07	152,21	-0,09%	2	2
D	158,98	158,93	0,03%	2	2
E	131,94	128,01	2,98%	1	2

Tendo em conta os resultados espelhados na Tabela 5.2, a análise da eficiência do uso da capacidade dos veículos utilizados na recolha (eficiência dada pelo indicador *VP*) mostra que o veículo A trabalha sempre numa capacidade mais próxima da sua capacidade máxima, que é de 11,5 m³, do que o veículo B. Em todos os circuitos o veículo A apresenta um volume preenchido médio superior a 80%, enquanto o veículo B apresenta valores inferiores a este no caso dos circuitos A e C (79% e 69%, respetivamente).

A Tabela 5.2 possibilita ainda analisar a distribuição do trabalho de recolha, utilizando como base o indicador *ES*. Pode concluir-se que o *ArcGIS* recorre mais frequentemente ao veículo B para a recolha do conteúdo dos ecopontos, à exceção do circuito B em que o veículo A serve mais ecopontos. Fazendo a mesma análise utilizando o indicador *DC* (*i.e.* distribuição do tempo total gasto pelos veículos a percorrer os circuitos) vê-se uma distribuição equitativa entre ambos os veículos do tempo total gasto na recolha do conteúdo dos ecopontos. Para três dos circuitos calculados, os veículos dividem aproximadamente o tempo total gasto na recolha (*i.e.* 50% para o veículo A e 50% para o veículo B) – circuitos A, C e D. No circuito B a distribuição mantém-se equilibrada, dividindo-se em 60% pelo veículo A e 40% pelo veículo B. A exceção verifica-se no circuito E, onde o veículo B é claramente utilizado mais intensivamente.

Tabela 5.2 – Cálculo dos indicadores *VP*, *ES* e *DC* referentes ao planeamento por tempo utilizando a funcionalidade “New VRP” do ArcGIS

Circuito	<i>VP</i>		<i>ES</i>		<i>DC</i>	
	Veíc. A [%]	Veíc. B [%]	Veíc. A [nº ecop.]	Veíc. B [nº ecop.]	Veíc. A [%]	Veíc. B [%]
A	80	79	20	30	48	52
B	89	84	36	28	60	40
C	98	69	29	36	51	49
D	85	95	26	43	50	50
E	99	85	14	34	29	71
Média	88	83	25	34	49	51

Na Figura 5.3 são apresentados os mapas que contêm as rotas obtidas para os circuitos A, D e E, onde a opção “*New Route*” gerou melhores resultados que a opção “*New VRP*”. As linhas a azul representam as rotas geradas através da opção “*New VRP*” e as linhas a vermelho representam as rotas geradas pela opção “*New Route*”.

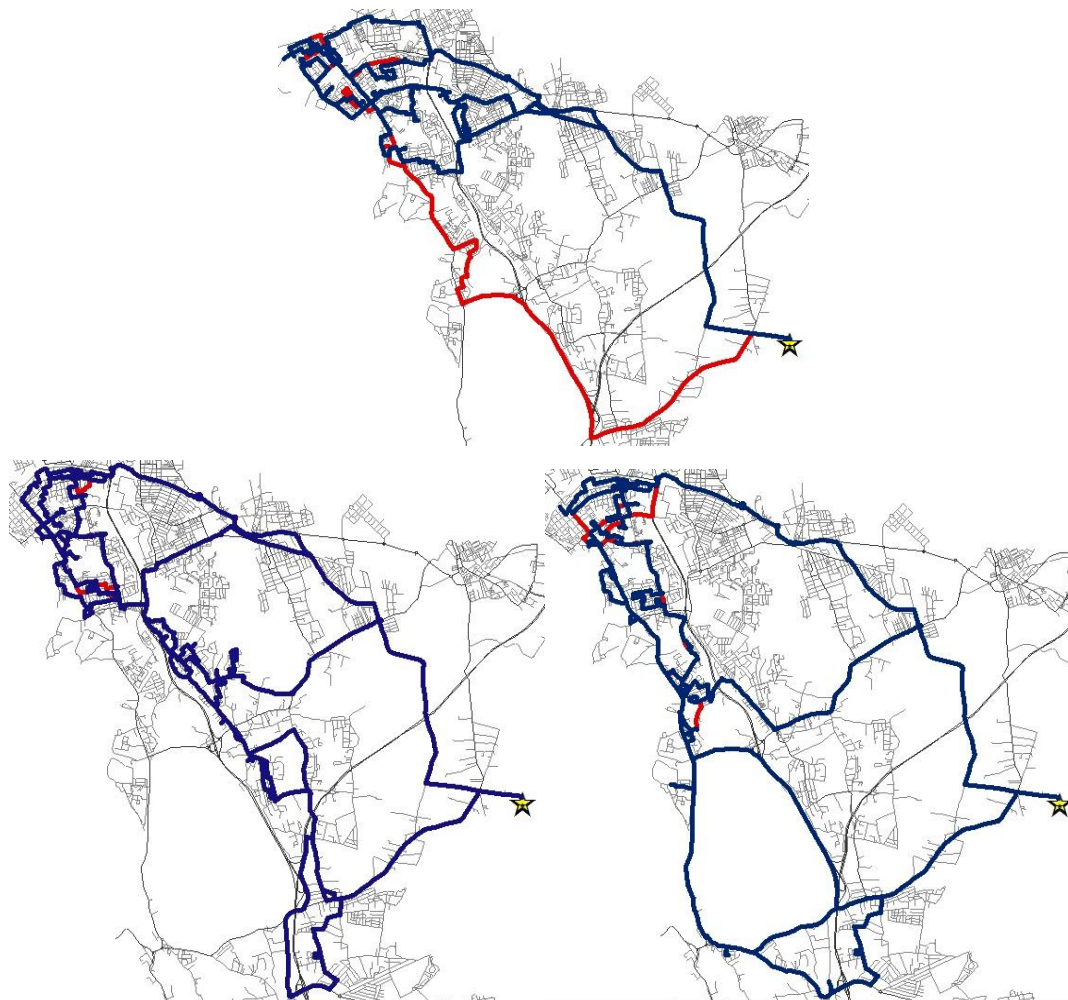


Figura 5.3 – Rotas obtidas para o planeamento por tempo e para os circuitos A (em cima), D (em baixo, à esquerda) e E (em baixo, à direita) utilizando as funcionalidades “*New VRP*” e “*New Route*” do *ArcGIS*

5.4.2 Planeamento minimizando a variável distância

Da análise da Tabela 5.3, e de forma análoga ao planeamento minimizando a variável tempo, constata-se uma melhoria genérica associada ao rearranjo das sequências das rotas através da funcionalidade “*New Route*”. De referir que o único caso em que isto não se verificou foi o do planeamento do circuito B, no qual o *ArcGIS* também utilizou o veículo A para a recolha do conteúdo de cinco ecopontos. Nos restantes, as melhorias variaram entre os 0,15% e os 3,29%, com poupanças em termos de distância que se situaram entre os 129 e os 3141 metros.

A eficiência na utilização da capacidade dos veículos de recolha traduzida através do indicador *VP* mostra uma utilização média da capacidade do veículo B próxima do valor máximo (*i.e.* 15,2 m³

para este veículo). Em todos os casos, o veículo B transporta um volume médio igual ou superior a 80% da sua capacidade máxima de recolha e transporte. Este facto contrasta com o do planeamento minimizando a variável tempo, no qual era o veículo A que apresentava uma utilização igual ou superior a 80% da sua capacidade máxima.

Tabela 5.3 – Resultados do planeamento por distância utilizando as funcionalidades “New VRP” e “New Route” do ArcGIS e cálculo dos indicadores MV e VP

Circuito	Funcionalidade utilizada		MV [%]	VP [%]	Número de Rotas
	“New VRP”	“New Route”			
	Distância [km]	Distância [km]			
A	88,617	88,488	0,15%	93	3
B	137,018 ^[1]	137,121 ^[1]	-0,01%	44 (Veíc. A); 84 (Veíc. B) ^[1]	1 (Veíc. A); 4 (Veíc. B)
C	89,390	88,646	0,83%	96	3
D	113,732	112,551	1,04%	80	4
E	93,582	92,441	1,22%	82	3

Nota: (1) – No circuito B, contrariamente aos restantes, o ArcGIS também recorreu ao veículo A para recolher o conteúdo de 5 ecopontos. Como tal, o cálculo do VP foi feito para o veículo A e para o veículo B.

Na Figura 5.4 são apresentados os mapas que contêm as rotas obtidas para os circuitos A e C e na Figura 5.5 os mapas que contêm as rotas obtidas para os circuitos D e E. Para todos estes circuitos a opção “New Route” gerou melhores resultados que a opção “New VRP”. As linhas a azul representam as rotas geradas através da opção “New VRP” e as linhas a vermelho representam as rotas geradas pela opção “New Route”.

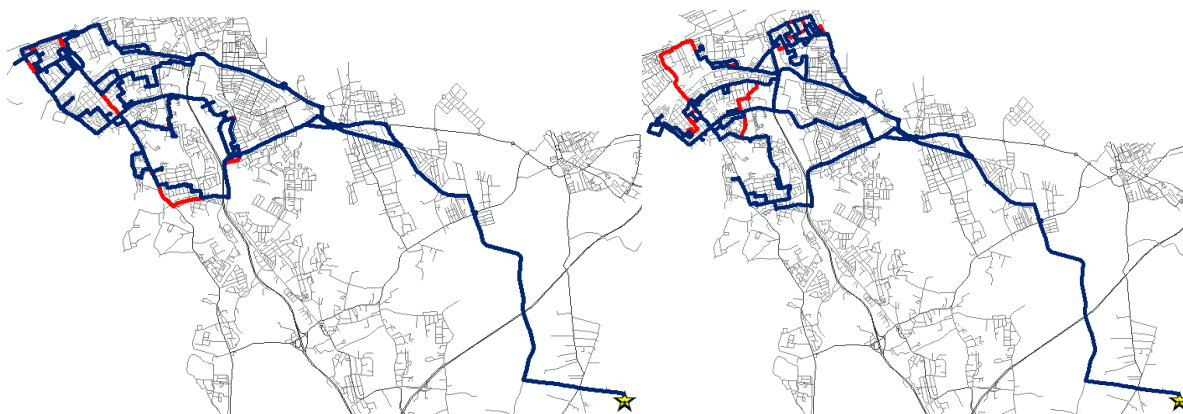


Figura 5.4 – Rotas obtidas para o planeamento por distância e para os circuitos A (esquerda) e C (direita) utilizando as funcionalidades “New VRP” e “New Route” do ArcGIS

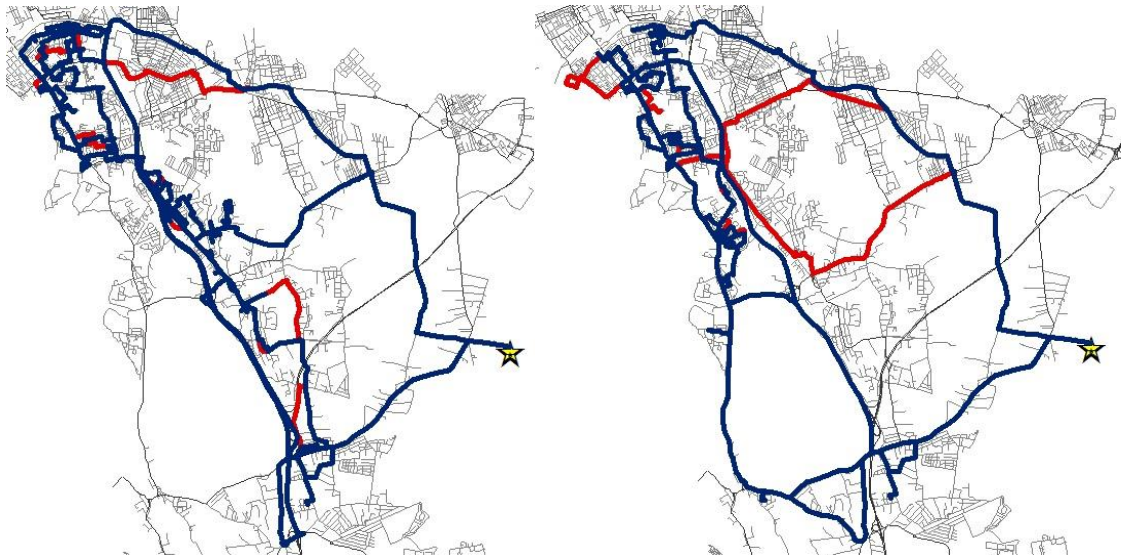


Figura 5.5 – Rotas obtidas para o planeamento por distância e para os circuitos D (esquerda) e E (direita) utilizando as funcionalidades “New VRP” e “New Route” do ArcGIS

5.5 Resultados obtidos através do *routePlanner*

Conforme mencionado na secção 4.2.2 e respetivas subsecções, o SAD *routePlanner*, pelo facto de implementar duas heurísticas, dá a oportunidade ao utilizador de gerar um conjunto de rotas iniciais que podem ser melhoradas posteriormente. As rotas iniciais são calculadas através do algoritmo sequencial da heurística construtiva de Clarke e Wright (1962) e a sua melhoria é calculada através da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956). Assim sendo, a análise dos resultados obtidos através do *routePlanner* é feita através da comparação entre as rotas iniciais e as rotas melhoradas. Para tal é calculado o indicador “Melhoria Verificada” (*MV*) com base nos valores de distância percorrida (para o planeamento por distância) e de tempo gasto (para o planeamento por tempo) associados às rotas obtidas. Para o cálculo deste indicador (ver equação (21)), no numerador são utilizados os valores das rotas melhoradas (contidos nas colunas C&W + 2-Opt das tabelas 5.4 e 5.6) e no denominador são utilizados os valores das rotas iniciais (contidos nas colunas C&W das mesmas tabelas). Desta forma, é determinado o valor percentual da melhoria associada à aplicação da heurística melhorativa às rotas geradas pela heurística construtiva de Clarke e Wright (1962).

Quando se efetuou o planeamento por distância, e para poder comparar as rotas calculadas através do *routePlanner* com as rotas calculadas através do *ArcGIS*, foi apenas utilizado o veículo B. Tendo esta particularidade em conta, os indicadores de distribuição de trabalho entre veículos *ES* e *DC* não foram calculados. No entanto, e de forma análoga ao que foi feito na análise dos resultados obtidos através do *ArcGIS*, foi calculado o indicador “Volume Preenchido” (*VP*), já que continua a ser importante para se aferir a eficiência no uso da capacidade do veículo de recolha. Também para o planeamento por tempo, por se utilizarem ambos os veículos na recolha, foram calculados todos os indicadores referidos para a análise dos resultados obtidos.

5.5.1 Planeamento minimizando a variável tempo

Como se pode verificar pela análise da Tabela 5.4, o tempo gasto a percorrer os circuitos de recolha de resíduos diminuiu quando as rotas obtidas inicialmente pela heurística de Clarke e Wright (1962) foram alteradas através da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956).

As melhorias verificadas variaram entre os 0,32% e os 1,74%, com poupanças de tempo que variaram entre os 0,64 e os 2,85 minutos. Embora ligeiras, estas melhorias, não implicam um aumento do esforço, quer por parte do utilizador (que apenas tem de seleccionar a *check-box* “Melhorar rotas”), quer computacional, pois não aumenta significativamente o tempo de resolução do problema.

Tabela 5.4 – Resultados do planeamento por tempo calculados pela heurística de Clarke e Wright (1962) (coluna C&W) e melhorados pela heurística 2-Opt (Flood, 1956) (coluna C&W + 2-Opt) e cálculo do indicador *MV*

Circuito	Heurística(s) utilizada(s)		<i>MV</i> [%]	Número de Rotas	
	C&W	C&W + 2-Opt		Veículo A	Veículo B
	Tempo [min]	Tempo [min]			
A	149,84	148,50	0,89	2	2
B	203,16	202,50	0,32	2	3
C	153,45	152,81	0,42	2	2
D	163,44	160,59	1,74	2	2
E	129,07	128,43	0,50	1	2

A eficiência no uso da capacidade de transporte dos veículos foi medida através do indicador (*VP*). Da análise dos valores da Tabela 5.5 verifica-se um melhor aproveitamento da capacidade do veículo B face ao veículo A. O *VP* do veículo B apresenta valores sempre superiores a 73%, sendo o *VP* para a maioria dos circuitos, igual a 99%, o que significa que o veículo se encontra cheio antes da descarga. A eficiência na utilização da capacidade do veículo A é menor, verificando-se, por exemplo, uma utilização entre os 53% e os 58% para dois circuitos.

A distribuição de carga de trabalho foi calculada através dos indicadores *ES* e *DC*. No que toca ao indicador *ES* pode constatar-se uma predominância na recolha do conteúdo dos ecopontos pelo veículo B. Em todos os circuitos este veículo serve um maior número de ecopontos quando comparado com o veículo A. No entanto, apesar da diferença significativa em alguns casos (por exemplo, para o circuito A, em que o veículo A recolhe 9 ecopontos e o veículo B recolhe 41), a distribuição da carga de trabalho mantém um rácio equilibrado: cerca de 40% do tempo total gasto no percurso dos circuitos refere-se ao veículo A e cerca de 60% ao veículo B. Ainda assim, verifica-se a predominância no uso do veículo B, com taxas de utilização que variam entre os 53% e os 68%. Por ser o veículo de maior capacidade (relembre-se, 15,2 m³ face aos 11,5 m³ do veículo A), um aumento na sua utilização pode significar um menor tempo total gasto no percurso de um circuito, o que se deve ao facto de não necessitar de tantas visitas à Amarsul para descarregar o seu conteúdo.

Tabela 5.5 – Cálculo dos indicadores *VP*, *ES* e *DC* referentes ao planeamento por tempo para os resultados melhorados pela heurística 2-Opt (Flood, 1956)

Circuito	<i>VP</i>		<i>ES</i>		<i>DC</i>	
	Veíc. A [%]	Veíc. B [%]	Veíc. A [nº ecop.]	Veíc. B [nº ecop.]	Veíc. A [%]	Veíc. B [%]
A	53	99	9	41	42	58
B	99	73	21	43	37	63
C	58	99	27	38	42	58
D	79	99	25	44	46	54
E	99	86	14	34	36	64
Média	75	90	19	40	39	61

5.5.2 Planeamento minimizando a variável distância

De forma análoga ao planeamento por tempo, analisando a Tabela 5.6 verifica-se que em todos os circuitos da Amarsul se obtiveram melhorias da distância percorrida ao aplicar a heurística melhorativa 2-Opt às rotas inicialmente obtidas ao aplicar a heurística construtiva de Clarke e Wright.

Os valores variaram entre os 0,20% e os 1,44% de melhoria, com poupanças de distância entre os 184 e os 1705 metros. Aqui também, apesar de ligeiras, estas melhorias não envolvem aumento de esforço quer por parte do utilizador, quer computacionais.

Para perceber a eficiência na utilização dos veículos de recolha, foi ainda calculado o indicador (*VP*). Em relação a este indicador, verifica-se uma utilização próxima da máxima capacidade do veículo B na recolha dos ecopontos dos circuitos A, B e C, e uma utilização igual ou ligeiramente superior a 80% para os circuitos D e E. Por só se utilizar um veículo os indicadores *ES* e *DC* não foram calculados, já que a carga de trabalho está toda concentrada num único veículo (*i.e.* todos os ecopontos são servidos pelo veículo B, que percorre a totalidade das distâncias dos circuitos).

Tabela 5.6 – Resultados do planeamento por distância obtidos pela heurística de Clarke e Wright (1962) (coluna C&W) e melhorados pela heurística 2-Opt (Flood, 1956) (coluna C&W + 2-Opt) e cálculo dos indicadores *MV* e *VP*

Circuito	Heurística(s) utilizada(s)		<i>MV</i> [%]	<i>VP</i> [%]	Número de Rotas
	C&W	C&W + 2-Opt			
	Distância [km]	Distância [km]			
A	89,265	88,060	1,35	93	3
B	118,361	116,656	1,44	92	4
C	91,059	90,875	0,20	96	3
D	95,085	94,441	0,68	80	4
E	88,825	88,171	0,74	82	3

5.6 Comparação dos resultados obtidos com as duas abordagens

A comparação das duas ferramentas utilizadas na resolução do problema VRP vai seguir a mesma metodologia aplicada nas secções 5.4 e 5.5, *i.e.* a apresentação dos valores das funções objetivo do planeamento de rotas efetuado (*i.e.* tempo e distância) e o cálculo dos indicadores apresentados na secção 5.3. De referir que esta comparação será feita entre as rotas obtidas através da funcionalidade “*New VRP*” do *ArcGIS* e das rotas melhoradas obtidas pelo *routePlanner* através da aplicação da heurística 2-Opt (Flood, 1956) às rotas iniciais obtidas através da heurística de Clarke e Wright (1962). A escolha de usar os valores obtidos através da funcionalidade “*New VRP*” justifica-se pelo elevado esforço adicional por parte do utilizador para melhorar as rotas através da funcionalidade “*New Route*” (nos casos em que ocorreram melhorias) (ver explicação na secção 5.4). A escolha pelas rotas melhoradas do *routePlanner* justifica-se por serem as melhores rotas (*i.e.* com menores valores de tempos e de distâncias) e por não comportarem um esforço adicional por parte do utilizador.

Inicialmente comparam-se os resultados obtidos para o planeamento por tempo através da análise de todos os indicadores apresentados na secção 5.3. Posteriormente comparam-se os resultados obtidos para o planeamento por distância, não sendo calculados os indicadores de distribuição do trabalho entre os dois veículos (*ES* e *DC*), uma vez que o *ArcGIS* apenas recorreu ao veículo B para efetuar a recolha (ver explicação na secção 4.2.1.2).

5.6.1 Planeamento minimizando a variável tempo

No que toca ao planeamento por tempo, a análise circuito a circuito da Tabela 5.7 não permite tirar conclusões imediatas sobre qual a melhor ferramenta para solucionar o problema VRP da Amarsul, uma vez que para uns circuitos o *routePlanner* gera melhores rotas que o *ArcGIS* (*e.g.* circuito A) e para outros circuitos gera rotas piores (*e.g.* circuito B). No entanto, se analisarmos a recolha dos ecopontos de todos os circuitos da Amarsul durante o período de um ano verificamos que as rotas obtidas através do *routePlanner* constituem uma solução ligeiramente melhor, com uma redução de 0,11% face ao *ArcGIS* (aproximadamente 14 minutos). Para o cálculo desta melhoria fez-se uma aproximação relativamente ao número de vezes em que cada um dos circuitos é percorrido durante um ano, considerando os seguintes pressupostos:

- A recolha do conteúdo dos ecopontos que estão englobados nos circuitos A, B e C é feita de 3 em 3 semanas;
- A recolha do conteúdo dos ecopontos dos circuitos D e E é feita de 4 em 4 semanas;
- O número de semanas por ano é igual a 52.

Tabela 5.7 – Resultados do planeamento por tempo obtidos através da funcionalidade “New VRP” do ArcGIS e da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) do routePlanner e comparação das duas ferramentas através do cálculo do indicador MV

Circuito	Número de vezes em que é percorrido por ano	Abordagem utilizada		MV ⁽¹⁾ [%]
		ArcGIS	routePlanner	
		Tempo [min]	Tempo [min]	
A	17,3	156,81	148,50	5,30
B	17,3	194,31	202,50	-4,21
C	17,3	152,07	152,81	-0,49
D	13	158,98	160,59	-1,01
E	13	131,94	128,43	2,66
Total por ano	-	12196,23	12184,15	0,11

Nota: (1) – Para o cálculo do indicador MV (ver equação (21)), no numerador são utilizados os valores das rotas geradas pelo routePlanner e no denominador são utilizados os valores das rotas geradas pelo ArcGIS.

No que toca à utilização da capacidade dos veículos de recolha (analisável através dos resultados do indicador VP na Tabela 5.8), verifica-se que o routePlanner utiliza sempre exhaustivamente um dos veículos em todos os circuitos. Isto faz com que, para esse mesmo veículo, a capacidade utilizada seja aproximadamente igual à sua capacidade máxima de recolha. Como tal, a capacidade do segundo veículo é sempre menos utilizada. No caso do ArcGIS a recolha é mais equitativa, o que faz com que a capacidade dos veículos não seja tão exhaustivamente utilizada.

Relativamente à distribuição do trabalho pelos dois veículos, na maioria dos casos verifica-se uma distribuição mais equitativa nas rotas geradas pelo ArcGIS do que nas geradas pelo routePlanner, uma vez que os valores dos indicadores ES e DC para ambos os veículos são mais próximos nas rotas geradas pelo ArcGIS (ver Tabela 5.8). Um exemplo é o do circuito A, em que o ArcGIS gera uma solução onde o veículo A recolhe 20 ecopontos e o veículo B 30 ecopontos. Para o mesmo circuito o routePlanner gera uma rota onde o veículo A recolhe apenas 9 ecopontos enquanto o veículo B recolhe 41. Outro exemplo é o do circuito D, onde o ArcGIS distribui a carga em 50% para o veículo A e 50% para o veículo B, enquanto o routePlanner afeta 47% ao veículo A e 53% ao veículo B.

Tabela 5.8 – Comparação dos resultados do planeamento por tempo obtidos através da funcionalidade “New VRP” do ArcGIS e da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) do routePlanner através do cálculo dos indicadores VP, ES e DC

Circuito	Abordagem utilizada	VP		ES		DC	
		Veíc. A [%]	Veíc. B [%]	Veíc. A [nº ecop.]	Veíc. B [nº ecop.]	Veíc. A [%]	Veíc. B [%]
A	ArcGIS	80	79	20	30	48	52
	routePlanner	53	99	9	41	42	58
B	ArcGIS	89	84	36	28	60	40
	routePlanner	99	73	21	43	37	63
C	ArcGIS	98	69	29	36	51	49
	routePlanner	58	99	27	38	42	58
D	ArcGIS	85	95	26	43	50	50
	routePlanner	79	99	25	44	46	54
E	ArcGIS	99	85	14	34	29	71
	routePlanner	99	86	14	34	36	64
Média	ArcGIS	88	83	25	34	49	51
	routePlanner	75	90	19	40	39	61

5.6.2 Planeamento minimizando a variável distância

Enquanto no planeamento por tempo a análise circuito a circuito não era conclusiva, no planeamento por distância, e à exceção do circuito C (onde o ArcGIS produz resultados melhores) e do circuito B (que não foi comparado nesta análise conforme explicado na nota (1) da Tabela 5.9), verificam-se melhorias nos restantes circuitos de recolha. As melhorias verificadas variaram entre os 0,63% e os 16,96%, com poupanças de distância entre os 557 e os 19291 metros. Em termos globais, se analisarmos a recolha dos ecopontos dos circuitos A, C, D e E durante o período de um ano (ver os pressupostos utilizados na secção 5.6.1), verificamos que os resultados produzidos pelo routePlanner apresentam uma melhoria percentual de 5,28% em relação ao ArcGIS, que se traduz numa poupança de distância de aproximadamente 305 km.

Relativamente à eficiência na utilização da capacidade do veículo B (analisada através do indicador VP) verifica-se que tanto o ArcGIS como o routePlanner apresentam uma utilização semelhante deste veículo. Em ambas as ferramentas e para todos os circuitos o veículo B apresenta um preenchimento médio da sua capacidade máxima igual ou superior a 80%.

Tabela 5.9 – Resultados do planeamento por distância obtidos através da funcionalidade “New VRP” do ArcGIS e da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) do routePlanner e comparação das duas ferramentas através do cálculo dos indicadores MV e VP

Circuito	Número de vezes em que é percorrido por ano	Abordagem utilizada		MV ^[2] [%]	VP ^[3]	
		ArcGIS	routePlanner		ArcGIS	routePlanner
		Distância [km]	Distância [km]		[%]	[%]
A	17,3	88,617	88,060	0,63	93	93
B	17,3	137,018 ^[1]	116,656 ^[1]	N.A. ^[1]	N.A. ^[1]	
C	17,3	89,390	90,875	-1,66	96	96
D	13	113,732	94,441	16,96	80	80
E	13	93,582	88,171	5,78	82	82
Total (não incluindo o circuito B ^[1])	-	5780,537	5475,496	5,28	-	

Notas: ⁽¹⁾ – No circuito B, contrariamente aos restantes, o ArcGIS também recorreu ao veículo A para recolher o conteúdo de 5 ecopontos. Isto torna os resultados obtidos no planeamento deste circuito incomparáveis, já que o routePlanner possibilita apenas utilizar o veículo A, o veículo B ou ambos de uma forma intensiva; ⁽²⁾ – Para o cálculo do indicador MV (ver equação (21)), no numerador são utilizados os valores das rotas geradas pelo routePlanner e no denominador são utilizados os valores das rotas geradas pelo ArcGIS; ⁽³⁾ – Embora a recolha seja feita apenas por um veículo, o indicador “Volume Preenchido” continua a ser um indicador relevante de comparação entre as abordagens. Neste caso, calculam-se os VPs associados às rotas calculadas pelo ArcGIS e às rotas calculadas pelo routePlanner.

Os resultados analisados anteriormente mostram que tanto para o planeamento por tempo como para o planeamento por distância o routePlanner conseguiu apresentar melhores resultados que o ArcGIS quando analisados na sua globalidade, *i.e.* quando consideramos a soma dos tempos e distâncias de todas as rotas de todos os circuitos. Note-se, no entanto, que o ArcGIS gerou rotas de melhor qualidade que o routePlanner para alguns circuitos, situação que ocorreu com maior frequência no planeamento por tempo em que o ganho global do routePlanner face ao ArcGIS foi de apenas 0,11%. No capítulo seguinte serão apresentadas em detalhe as conclusões retiradas dos resultados acima apresentados.

6 Conclusões e trabalho futuro

6.1 Conclusões

A gestão de resíduos sólidos é um processo complexo e a operação de recolha e transporte de resíduos tem sido alvo de inúmeros estudos. Do ponto de vista económico, esta operação é dispendiosa e sobrecarrega a dependência energética do país. Do ponto de vista ambiental, a elevada emissão de gases poluentes associada a esta operação constitui uma preocupação atual. Para reduzir os custos e as emissões associadas à recolha e transporte de resíduos é fundamental criar mecanismos que a tornem mais eficiente. Foi no âmbito desta temática que a presente dissertação se inseriu, nomeadamente através da resolução do problema VRP da Amarsul e do respetivo cálculo de rotas eficientes de recolha e transporte.

Para resolver o problema VRP recorreu-se a duas ferramentas diferentes (um *software* comercial – *ArcGIS* – e um *software* desenvolvido especificamente para este trabalho – *routePlanner*) e obtiveram-se conjuntos de rotas eficientes minimizando separadamente as variáveis tempo despendido e distância percorrida. Para aferir a qualidade das rotas geradas por aquelas ferramentas foram comparados, para cada uma delas, os resultados obtidos pelas diferentes opções de resolução internas (*i.e.* para o *ArcGIS* foram comparadas as rotas geradas pela funcionalidade “*New VRP*” com as rotas geradas pela funcionalidade “*New Route*”, e para o *routePlanner* foi analisada a magnitude de melhoria conseguida através da aplicação da heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) às rotas inicialmente geradas pela heurística construtiva de Clarke e Wright (1962)), e comparados entre ambas os resultados obtidos (*i.e.* comparada a funcionalidade “*New Route*” do *ArcGIS* com a que utiliza a heurística melhorativa 2-Opt (Flood, 1956) do *routePlanner*). Esta análise foi feita através da comparação dos seguintes parâmetros (para maior detalhe ver secção 5.3):

1. Valor da função objetivo, *i.e.* para a minimização da distância foram comparadas as distâncias associadas às rotas obtidas em cada uma das ferramentas, para a minimização do tempo foram comparados os tempos associados às rotas obtidas em cada uma das ferramentas;
2. Conjunto de outros indicadores que espelham a eficiência de uma rota de recolha e transporte, *i.e.* a distribuição de ecopontos por cada um dos veículos de recolha e transporte (indicador “Ecopontos Servidos” (*ES*)), a utilização da capacidade de carga dos veículos (indicador “Volume Preenchido” (*VP*)) e a distribuição da distância percorrida ou do tempo despendido na recolha e transporte dos resíduos de um determinado circuito (indicador “Distribuição da Carga” (*DC*)).

A comparação dos resultados obtidos através da aplicação de ambas as ferramentas para resolução do problema VRP da Amarsul são descritas de seguida:

***ArcGIS* – Comparação dos resultados obtidos através das funcionalidades “*New Route*” e “*New VRP*”**

- No planeamento por tempo, e para dois dos circuitos da Amarsul, as rotas obtidas no *ArcGIS* através da funcionalidade “*New VRP*” não foram as mais eficientes, já que se obtiveram

melhorias de eficiência entre os 0,40% e os 2,98% através da aplicação da “*New Route*” às rotas geradas pela “*New VRP*”;

- Para este planeamento, e através do cálculo dos indicadores *VP*, *ES* e *DC*, verificou-se uma distribuição equitativa do trabalho pelos dois veículos da Amarsul na maioria dos circuitos de recolha e transporte;
- No planeamento por distância, a utilização da funcionalidade “*New Route*” sobre as rotas geradas pela “*New VRP*” representou melhorias das distâncias em quatro dos cinco circuitos, que corresponderam a ganhos entre os 0,15% e os 1,22%;
- Para este planeamento, o *ArcGIS* utilizou a capacidade do veículo B sempre próxima do seu limite máximo (capacidade utilizada sempre com valores superiores a 80%).

***routePlanner* – Comparação dos resultados obtidos através da heurística construtiva de Clarke e Wright (1962) com a melhorativa 2-Opt (Flood, 1956)**

- Quer para o planeamento por tempo, quer para o planeamento por distância, a heurística 2-Opt melhorou entre 0,32% e 1,44% os valores da função objetivo para as rotas de todos os circuitos da Amarsul;
- Contrariamente ao *ArcGIS*, o *routePlanner* privilegiou a utilização do veículo de maior capacidade para recolha do conteúdo dos contentores de ecoponto (veículo B), uma vez que era aquele que implicava menos descargas na estação de tratamento;
- Analogamente ao *ArcGIS*, no planeamento por distância o *routePlanner* utilizou a capacidade do veículo B sempre em valores superiores a 80%.

***ArcGIS* e *routePlanner* – Comparação dos resultados obtidos através da funcionalidade “*New VRP*” e da heurística de Clarke e Wright (1962) melhorada pela 2-Opt (Flood, 1956)**

- No planeamento por tempo, e considerando um período igual a um ano e o tempo gasto a recolher os ecopontos de todos os circuitos, o *routePlanner* gerou rotas de recolha e transporte mais eficientes que o *ArcGIS* em aproximadamente 0,11%;
- Para este planeamento, e quando analisados os circuitos separadamente, verifica-se que o *ArcGIS* consegue gerar rotas mais eficientes que o *routePlanner* para alguns dos circuitos;
- Conforme referido anteriormente, e quando comparado com o *routePlanner*, o *ArcGIS* distribuiu de forma mais equitativa o trabalho por ambos os veículos de recolha e transporte;
- No planeamento por distância, e considerando um período igual a um ano e a distância percorrida a recolher os ecopontos de todos os circuitos, o *routePlanner* gerou rotas de recolha e transporte mais eficientes que o *ArcGIS* em aproximadamente 5,28%, o que é significativamente superior ao ganho obtido no planeamento por tempo (0,11%);
- No planeamento por distância ambas as ferramentas utilizaram de igual forma a capacidade do veículo de recolha e transporte, capacidade esta que se aproximou do seu valor máximo.

Da análise global destes resultados, e tendo em conta as características da rede de recolha e transporte dos contentores de ecoponto de vidro reciclável da Amarsul e as características de ambas

as ferramentas utilizadas, podemos concluir que o *routePlanner* é uma ferramenta mais potente que o *ArcGIS*. Facto que se comprova tanto com a soma dos tempos como com a soma das distâncias de todas as rotas geradas, pois os valores obtidos com o *routePlanner* são inferiores, e por isso melhores, do que os obtidos com o *ArcGIS*. No entanto, a melhor solução é utilizar ambas as ferramentas para determinar as rotas de todos os circuitos e escolher depois as melhores soluções geradas, já que para alguns circuitos o *routePlanner* gera rotas mais eficientes que o *ArcGIS* e noutros acontece o contrário. É ainda importante referir a importância do *ArcGIS* na obtenção de alguns dos *inputs* utilizados no *routePlanner*, nomeadamente as matrizes Origem-Destino de tempos e de distâncias, e o facto de o *routePlanner* ter sido uma solução desenvolvida à medida para a rede de recolha e transporte da Amarsul, ainda que tenha alguma adaptabilidade a outros problemas.

6.2 Trabalho futuro

A presente dissertação mostrou que o *ArcGis* e o *routePlanner* são ferramentas importantes para a obtenção de rotas de recolha e transporte. No entanto, ainda que em termos globais se tenha verificado que o SAD desenvolvido (o *routePlanner*) gerou rotas mais eficientes que o *ArcGIS*, quando analisadas as rotas circuito a circuito verificou-se que houve muitos casos em que o *ArcGIS* gerou rotas melhores. Como tal, futuramente deverão ser estudadas quais as características dos circuitos de recolha e transporte que influenciam positivamente / negativamente os resultados obtidos pelo *ArcGIS*. Nesta análise será também interessante perceber o porquê de, por vezes, as rotas geradas através da funcionalidade “*New VRP*” não serem as melhores que o *ArcGIS* pode apresentar (na dissertação verificou-se que, em muitas situações, a funcionalidade “*New Route*”, partindo das rotas geradas pela funcionalidade “*New VRP*”, conseguia melhorá-las através do rearranjo das sequências de recolha).

No que diz respeito aos métodos de resolução do problema VRP, sugere-se a implementação de heurísticas mais complexas que a de Clarke e Wright (1962) num SAD, sendo de especial interesse a implementação de uma meta-heurística *tabu search* (Glover, 1986). Desta forma, seria possível analisar a melhoria comparativa entre as rotas geradas pela heurística *tabu search* (Glover, 1986) e as rotas geradas pela heurística de Clarke e Wright (1962) e melhoradas pela heurística 2-Opt (Flood, 1956). Seria ainda possível comparar de forma mais direta o SAD e o *ArcGIS*, já que o SAD passaria a utilizar o mesmo algoritmo que o *ArcGIS*.

Relativamente às funções objetivo para as quais é feito o planeamento das rotas, e considerando que se tem vindo a verificar um aumento das preocupações ambientais e um conseqüente aumento da legislação ambiental, propõe-se o estudo do problema VRP utilizando como função objetivo a minimização da emissão de gases poluentes. Por exemplo, poder-se-á utilizar como base de trabalho o *routePlanner*, que já tem uma estrutura de base de dados definida, sendo para isso necessário obter uma matriz origem-destino com os valores de emissão de gases poluentes referentes a cada arco entre os diferentes nós da rede de recolha e transporte da Amarsul.

Uma última linha de orientação para trabalhos futuros pressupõe a alteração de características do sistema de recolha e transporte da Amarsul, nomeadamente da sua frota de veículos disponíveis para recolher os resíduos de vidro reciclável. Como tal, sugere-se o estudo do impacto da alteração dos

veículos de recolha por outros mais eficientes através do cálculo da viabilidade económica associada a esta troca (e.g. valor atual líquido, da taxa interna de rentabilidade e do período de *payback*). Neste estudo, deverá também ser contabilizado o impacto ambiental associado à conseqüente redução de emissões.

Referências

- Alagöz, A., Kocasoy, G. (2008). Improvement and modification of the routing system for the healthcare waste collection and transportation in Istanbul. *Waste Management*, 28(8), 1461–1471.
- Alam, R., Chowdhury, M. A. I., Hasan, G. M. J., Karanjit, B., Shrestha, L. R. (2008). Generation, storage, collection and transportation of municipal solid waste - A case study in the city of Kathmandu, capital of Nepal. *Waste Management*, 28(6), 1088–1097.
- Amador, J. (2010). Energy Production and Consumption in Portugal: Stylized Facts. *Economic Bulletin* - Volume 16, Number 2 (pp. 69–83). Lisbon, Portugal: Banco de Portugal. Disponível em http://www.bportugal.pt/en-US/EstudosEconomicos/Publicacoes/BoletimEconomico/BEAnteriores/Documents/bol_verao10_e.pdf (Acedido em 27/08/2016).
- Amarsul (2011a). Comunicado de Imprensa - Amarsul desenvolve sistema inovador para otimizar recolha de resíduos. Palmela, Portugal: Amarsul. Disponível em <http://www.amarsul.pt/public/documents/21cc74609b3f81b72f41c7f5c3e05208.pdf> (Acedido em 25/05/2013).
- Amarsul (2011b). Amarsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos S.A. Disponível em <http://www.amarsul.pt/index.php/pt/amarsul> (Acedido em 25/05/2013).
- APA (2012). PERSU II - Relatório de Acompanhamento 2010. Lisboa, Portugal: Agência Portuguesa do Ambiente - Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- APA (2013). Pneus Usados. Disponível em <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=287> (Acedido em 27/08/2016).
- Badran, M. F., El-Haggar, S. M. (2006). Optimization of municipal solid waste management in Port Said - Egypt. *Waste Management*, 26(5), 534–545.
- Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., Mingozzi, A. (2004). An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation. *Operations Research*, 52(5), 723–738.
- Baldacci, R., Mingozzi, A. (2009). A unified exact method for solving different classes of vehicle routing problems. *Mathematical Programming*, 120(2), 347–380.
- Baptista, S., Oliveira, R. C., Zúquete, E. (2002). A period vehicle routing case study. *European Journal of Operations Research*, 139(2), 220–229.
- Beasley, J. E. (1983). Route-First Cluster-Second Methods for Vehicle Routing. *Omega*, 11(4), 403–408.

- Beijoco, A. F. (2011). *Optimização de um Sistema de Recolha e Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34(3), 209–219.
- Bell, J. E., McMullen, P. R. (2004). Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Advanced Engineering Informatics*, 18(1), 41–48.
- Benjamin, A. M., Beasley, J. E. (2010). Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2270–2280.
- Bing, X., Bloemhof, J. M., Ramos, T. R. P., Barbosa-Póvoa, A. P., Wong, C. Y., van der Vorst, J. G. A. J. (2015). Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Management*, 48, 584–592.
- Chalkias, C., Lasaridi, K. (2009). A GIS based model for the optimisation of municipal solid waste collection: the case study of Nikea, Athens, Greece. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(10), 640–650.
- Chalkias, C., Lasaridi, K. (2011). Benefits from GIS Based Modelling for Municipal Solid Waste Management. In M. S. Kumar (Ed.), *Integrated Waste Management - Volume I* (pp. 417–436). Rijeka, Croatia: InTech.
- Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. (1981). Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem, based on Spanning Tree and Shortest Path Relaxations. *Mathematical Programming*, 20(1), 255–282.
- Christopher, M. (2011). *Logistics & Supply Chain Management* (4th ed.). Harlow, Great Britain: Prentice Hall-Financial Times.
- Clarke, G., Wright, J. W. (1962). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581.
- Coene, S., Arnout, A., Spieksma, F. C. R. (2008). The Periodic Vehicle Routing Problem: A Case Study. FBE Research Report KBI_0828. Leuven, Belgium: K. U. Leuven.
- Cordeau, J-F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.-Y., Semet, F. (2002). A Guide to Vehicle Routing Heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53(5), 512–522.
- Cordeau, Jean-François, Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., Sormany, J.-S. (2005). New Heuristics for the Vehicle Routing Problem. In A. Langevin & D. Riopel (Eds.), *Logistics Systems: Design and Optimization* (pp. 279–297). New York, USA: Springer Science+Business Media, Inc.
- Dantzig, G. B., Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80–91.

- Dantzig, G., Fulkerson, R., Johnson, S. (1954). Solution of a Large-Scale Travelling-Salesman Problem. The Rand Corporation. Santa Monica, CA.
- Dastghaibifard, G. H., Ansari, E., Sheykhalishahi, S. M., Bavandpouri, A., Ashoor, E. (2008). A Parallel Branch and Bound Algorithm for Vehicle Routing Problem. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists* (Vol. II). Hong Kong, China.
- Dijkstra, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271.
- DPS International (2008). LogiX. Disponível em <http://www.dps-int.com/products/desktop/vehiclescheduling.php?ref=topNav> (Acedido em 25/05/2013).
- Druzdel, M., Flynn, R. R. (2002). Decision Support Systems. To appear in *Encyclopedia of Library and Information Science* (2nd ed.), Allen Kent (ed.), New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. Disponível em <http://www.pitt.edu/~druzdel/psfiles/dss.pdf> (Acedido em 28/08/2016).
- Dueck, G. (1993). New optimization heuristics: The great deluge algorithm and the record-to-record travel. *Journal of Computational Physics*, 104(1), 86–92.
- ESRI (2008). ArcGIS 9 - What is ArcGIS 9.3. Redlands, USA: ESRI. Disponível em http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/pdf/what_is_arcgis.pdf (Acedido em 03/09/2016).
- ESRI (2010). ArcGIS - The Complete Geographic Information System. Redlands, USA: ESRI. Disponível em http://www.esriportugal.pt/files/4213/1057/3361/ArcGIS_Dkt.pdf (Acedido em 03/09/2016).
- ESRI (2011). ArcGIS Extensions. Redlands, USA: ESRI. Disponível em <http://www.esri.com/library/brochures/pdfs/arcgisextbro.pdf> (Acedido em 03/09/2016).
- ESRI (2012). What is GIS?. Redlands, USA: ESRI. Disponível em <http://www.esri.com/~media/c371f47805c345fa84d32ac8a675046e.pdf> (Acedido em 03/09/2016).
- ESRI (2013). ArcView. Disponível em <http://www.esri.com/software/arcgis/arcview> (Acedido em 03/09/2016).
- ESRI (2016a). Vehicle routing problem analysis - Time attribute. Disponível em <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/network-analyst/vehicle-routing-problem.htm> (Acedido em 03/09/2016).
- ESRI (2016b). Algorithms used by the ArcGIS Network Analyst extension. Disponível em <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm#GUID-D50336EC-7FBA-43FA-AD31-4272AB544393> (Acedido em 03/09/2016).
- Fisher, M. L., Jaikumar, R. (1981). A Generalized Assignment Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Networks*, 11(2), 109–124.
- Flood, M. M. (1956). The Travelling-Salesman Problem. *Operations Research*, 4(1), 61–75.

- Gaines, L., Vyas, A., Anderson, J. L. (2006). Estimation of Fuel Use by Idling Commercial Trucks (Paper No. 06-2567). Argonne, USA: Center for Transportation Research - Argonne National Laboratory.
- Garey, M. R., Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. San Francisco: W.H. Freeman and Company.
- Garg, A., Smith, R., Hill, D., Longhurst, P. J., Pollard, S. J. T., Simms, N. J. (2009). An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from municipal solid waste. *Waste Management*, 29(8), 2289–2297.
- Gendreau, M., Potvin, J., Bräysy, O., Hasle, G., Løkketangen, A. (2008). Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and Its Extensions: A Categorized Bibliography. In B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil (Eds.), *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges* (Vol. 43, pp. 143–169). New York, USA: Springer Science+Business Media, Inc.
- Ghose, M. K., Dikshit, A. K., Sharma, S. K. (2006). A GIS based transportation model for solid waste disposal - A case study on Asansol municipality. *Waste Management*, 26(11), 1287–1293.
- Gillet, B. E., Miller, L. R. (1974). A Heuristic Algorithm for the Vehicle Dispatch Problem. *Operations Research*, 22(2), 340–349.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533–549.
- Golden, B. L., Wasil, E. A., Kelly, J. P., Chau, L.-M. (1998). Metaheuristics in vehicle routing. In T. G. Crainic & G. Laporte (Eds.), *Fleet Management and Logistics* (pp. 33–56). Boston, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Hillier, F. S., Lieberman, G. J. (2001). *Introduction to Operations Research* (7th ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- Hogg, D. (2002). Costs for Municipal Waste Management in the EU - Final Report to Directorate General Environment, European Commission.
- IBM (2009a). IBM ILOG Dispatcher V4.7 User's Manual. IBM.
- IBM (2009b). IBM ILOG Solver V6.7 User's Manual. IBM.
- INE (2012). Resíduos urbanos recolhidos por localização geográfica, tipo de recolha e tipo de destino. Disponível em http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0005385&contexto=bd&selTab=tab2 (Acedido em 28/08/2016).
- Iori, M., González, J. J. S., Vigo, D. (2007). An Exact Approach for the Vehicle Routing Problem with Two-Dimensional Loading Constraints. *Transportation Science*, 41(2), 253–264.
- Johnson, D. S., McGeoch, L. A. (1997). The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization. In E. H. L. Aarts & J. K. Lenstra (Eds.), *Local Search in Combinatorial Optimization* (pp. 215–310). London, Great Britain: John Wiley & Sons, Inc.

- Karadimas, N. V., Doukas, N., Kolokathi, M., Defteraiou, G. (2008). Routing Optimization Heuristics Algorithms for Urban Solid Waste Transportation Management. *WSEAS Transactions on Computers*, 7(12), 2022–2031.
- Karadimas, N. V., Kolokathi, M., Defteraiou, G., Loumos, V. (2007). Municipal Waste Collection of Large Items Optimized with Arc GIS Network Analyst. *21st European Conference on Modelling and Simulation* (Vol. 4). Prague, Czech Republic.
- Kim, B.-I., Kim, S., Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 33(12), 3624–3642.
- Komilis, D. P. (2008). Conceptual modeling to optimize the haul and transfer of municipal solid waste. *Waste Management*, 28(11), 2355–2365.
- Kulcar, T. (1996). Optimizing solid waste collection in Brussels. *European Journal of Operational Research*, 90(1), 71–77.
- Kuo, Y., Wang, C.-C. (2011). Optimizing the VRP by minimizing fuel consumption. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 22(4), 440–450.
- Kytöjoki, J. J., Nuortio, T., Bräysy, O. (2004). Two Efficient Metaheuristics for Huge Scale Vehicle Routing Problems. Working Paper. Department of Environmental Sciences - University of Kuopio, Finland.
- Langevin, A., Riopel, D. (Eds.). (2005). *Logistics Systems: Design and Optimization*. New York, USA: Springer Science+Business Media, Inc.
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345–358.
- Laporte, G. (2007). What You Should Know about the Vehicle Routing Problem. *Naval Research Logistics*, 54(8), 811–819.
- Laporte, G., Semet, F. (2002). Classical Heuristics for the Capacitated VRP. In P. Toth & D. Vigo (Eds.), *The Vehicle Routing Problem* (pp. 109–128). Philadelphia, USA: SIAM monographs on discrete mathematics and applications.
- Lin, S. (1965). Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem. *Bell System Technical Journal*, 44(10), 2245–2269.
- Lysgaard, J. (1997). Clarke & Wright's Savings Algorithm. Aarhus, Denmark: Department of Management Science and Logistics - The Aarhus School of Business.
- Lopes, D., Ramos, T. R. P., Barbosa-Póvoa, A. P. (2015). Optimization of a Recyclable Waste Collection System – The Valorsul Case Study. In A. P. Barbosa-Póvoa & J. L. Miranda (Eds.), *Operations Research and Big Data* (pp. 97–105). Switzerland: Springer International Publishing.
- MA (1997). PERSU - Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Lisboa, Portugal: Ministério do Ambiente - Instituto Nacional de Resíduos.

- Magrinho, A., Didelet, F., Semião, V. (2006). Municipal solid waste disposal in Portugal. *Waste Management*, 26(12), 1477–1489.
- Makan, A., Malamis, D., Assobhei, O., Loizidou, M., Mountadar, M. (2011). Solid waste management: case of collection and Vehicle Routing Problem in the city of Azemmour, Morocco. *International Journal of Management Science*, 6(4), 247–255.
- MAOTDR (2006). Decreto-Lei n.o 178/2006. Diário da República, 1.ª série - Nº 171 (pp. 6526–6545). Lisboa, Portugal: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- MAOTDR (2007). PERSU II - Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (Primeira). Lisboa, Portugal: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- Maximal Software, Inc. (2006). MPL Modeling System. Disponível em <http://www.maximalusa.com/mpl/> (Acedido em 25/05/2013).
- Mazzeo, S., Loiseau, I. (2004). An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 18, 181–186.
- McLeod, F., Cherrett, T. (2008). Quantifying the transport impacts of domestic waste collection strategies. *Waste Management*, 28(11), 2271–2278.
- Miller, C. E., Tucker, A. W., Zemlin, R. A. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM*, 7(4), 326–329.
- Mladenovic, N., Hansen, P. (1997). Variable Neighborhood Search. *Computers & Operations Research*, 24(11), 1097–1100.
- MOPTC (2010). Decreto-Lei n.o 133/2010. Diário da República, 1.ª série - Nº 246-22 (pp. 5884–5890). Lisboa, Portugal: Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- Nema, A. K., Gupta, S. K. (1999). Optimization of regional hazardous waste management systems: an improved formulation. *Waste Management*, 19(7-8), 441–451.
- Nguyen, T. T., Wilson, B. G. (2010). Fuel consumption estimation for kerbside municipal solid waste (MSW) collection activities. *Waste Management & Research*, 28(4), 289–297.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J. J., Niska, H., Bräysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30(2), 223–232.
- Oliveira, F. (2002). Map Analysis with Networks. Department of Civil Engineering, Texas A&M University. Disponível em <http://ceprofs.tamu.edu/foliveira/GISCE/Spring2002/Presentations/NetworksIntro.ppt> (Acedido em 27/08/2016).
- Orman, A. J., Williams, H. P. (2007). A Survey of Different Integer Programming Formulations of the Travelling Salesman Problem. *Advances in Computational Management Science*, 9, 91–104.

- Pitney Bowes Software (2011). MapInfo Professional. Disponível em <http://www.pbinsight.com/welcome/mapinfo/> (Acedido em 25/05/2013).
- Potvin, J.-Y., Rousseau, J. M. (1995). An Exchange Heuristic for Routing Problems with Time Windows. *Journal of the Operational Research Society*, 46(12), 146–154.
- Ramakrishnan, R., Gehrke, J. (2002). *Database Management Systems* (3rd ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega*, 48, 60–74.
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 34–54.
- Rhoma, F., Zhang, Z., Luo, Y., Noche, B. (2010). Environmental & Economical Optimization for Municipal Solid Waste Collection Problems, A Modeling and Algorithmic Approach Case Study. *Mathematical Methods, Computational Techniques, Intelligent Systems. Sousse, Tunisia: WSEAS*.
- Roadnet Technologies, Inc. (2012). Roadnet Transportation Suite. Disponível em <http://www.roadnet.com/pub/products/Roadnet-Transportation-Suite/> (Acedido em 25/05/2013).
- Rochat, Y., Taillard, É. D. (1995). Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. *Journal of Heuristics*, 1(1), 147–167.
- Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J. (2003). Implementação em SIG de uma Heurística para o Estudo da Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos. Research Report No. 6/2003. Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC) Coimbra, Portugal.
- Sbihi, A., Eglese, R. W. (2007). Combinatorial optimization and Green Logistics. *4OR*, 5(2), 99–116.
- Sharholly, M., Ahmad, K., Vaishya, R. C., Gupta, R. D. (2007). Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India. *Waste Management*, 27(4), 490–496.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows Constraints. *Operations Research*, 35(2), 254–265.
- Sumathi, V. R., Natesan, U., Sarkar, C. (2008). GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 28(11), 2146–2160.
- Taillard, E., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y. (1997). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *Transportation Science*, 31(2), 170–186.
- Tarantilis, C. D., Kiranoudis, C. T. (2002). BoneRoute: An adaptive memory based method for effective fleet management. *Annals of Operations Research*, 115(1), 227–241.

- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semião, V., Carvalho, M. G. (2008). A case study of fuel savings through optimization of MSW transportation routes. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 19(4), 444–454.
- Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management*, 29(3), 1176–1185.
- Tchobanoglous, G. (2003). Solid Waste Management. In J. A. Salavato, N. L. Nemerow, & F. J. Agardy (Eds.), *Environmental Engineering* (5th ed., pp. 755–888). Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Touati-Moungla, N., Jost, V. (2012). On green routing and scheduling problem. Research Report published in HAL (ref. hal-00674437).
- US Department of Energy (2008). Fuel Economy Guide. Germantown, USA: EERE Information Center. Disponível em <http://www.fueleconomy.gov/feg/feg2008.pdf> (Acedido em 27/08/2016).
- Voudouris, C., Tsang, E. (1999). Guided local search and its application to the traveling salesman problem. *European Journal of Operations Research*, 113(2), 469–499.
- Wegener, I. (2005). *Complexity Theory: Exploring the Limits of Efficient Algorithms*. Berlin, Germany: Springer.
- Winston, W. L. (2003). *Operations Research: Applications and Algorithms* (4th ed.). Belmont, USA: Duxbury Press.
- Wy, J., Kim, B.-I., Kim, S., Sahoo, S. (2010). Rollon-Rolloff Vehicle Routing Problem in the Waste Collection Industry. The 11th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference. Melaka, Malaysia.
- Zamorano, M., Molero, E., Grindlay, A., Rodríguez, M. L., Hurtado, A., Calvo, F. J. (2009). A planning scenario for the application of geographical information systems in municipal waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain). *Resources, Conservation and Recycling*, 54(2), 123–133.
- Zsigraiova, Z., Semiao, V., Beijoco, F. (2013). Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal. *Waste Management*, 33(4), 793–806.