



Ana Rita Elói da Silva Optimização da recolha de resíduos urbanos



Ana Rita Elói da Silva Optimização da recolha de resíduos urbanos

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

"A procura de um modelo mais sustentável de evolução da sociedade tem constituído preocupação dominante nas últimas décadas face ao conjunto de oportunidades, mas também de ameaças, que afectam o conjunto do tecido social, a estrutura das actividades económicas e o equilíbrio ambiental."

Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável 2015

o júri

presidente

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

orientador

Professor Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

arguente

Professor Doutor Rui Pedro de Sousa Pereira Monteiro Julião

Professor Auxiliar do Departamento de Geografia e Planeamento Regional da Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa

agradecimentos

Na fase final de mais um desafio, chega o momento de agradecer a todos os que de alguma forma me acompanharam e partilharam comigo as angústias e alegrias sentidas.

Gostaria de expressar o meu agradecimento ao Professor Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos pela disponibilidade, apoio, acompanhamento e conhecimentos transmitidos ao longo do desenvolvimento da tese.

Agradeço à Ambirumo – Projectos, Inovação e Gestão Ambiental, Lda., com a qual mantenho um vínculo laboral há mais de três anos, pois sem o seu consentimento a realização da presente tese não teria sido possível.

Agradeço à Valor Ambiente – Gestão e Administração de Resíduos da Madeira, S.A. que autorizou o uso de elementos para exposição do caso de estudo.

Agradeço a todos os meus amigos.

Um especial agradecimento a toda a minha família.

Um especial agradecimento ao meu namorado pela paciência, força e apoio dados.

A todos o meu sincero agradecimento.

Dedico a minha tese de mestrado aos meus Pais

palavras-chave

Problemas de transporte, análise de redes, sistemas de informação geográfica, bases de dados, rede viária, percursos de recolha de resíduos, indicadores de recolha, optimização de percursos, *Network Analyst*, *Vehicle Routing Problem*

resumo

O elevado custo da operação de recolha e a obrigatoriedade de cumprimento do disposto em instrumentos legais nacionais e comunitários, designadamente a implementação de circuitos de recolha selectiva que promovam a reciclagem e valorização, estão na origem do estudo de soluções que permitam otimizar a operação de recolha de resíduos.

Pretende o presente trabalho dar uma contribuição para a optimização da recolha de resíduos urbanos a partir da aplicação de um *software* desenvolvido para calcular percursos optimizados entre pontos de interesse – o *Network Analyst*, suportado em ambiente de sistemas de informação geográfica.

A operação de recolha de resíduos constitui um problema de transporte baseando-se a sua solução na análise de redes.

Actualmente assiste-se à expansão dos sistemas de informação geográfica como uma potencial ferramenta de gestão das infra-estruturas de recolha de resíduos porque, por um lado, permitem a manipulação de dados georeferenciados de várias fontes e, por outro, podem funcionar como interface de suporte para aplicações de cálculo de percursos de recolha de resíduos.

A partir da análise da aplicação do *Network Analyst* a um caso de estudo de determinação de percursos de recolha de resíduos urbanos conclui-se que a aplicação em causa constitui um instrumento aplicável ao serviço de recolha de resíduos, mas com algumas condicionantes, pois a operação de recolha de resíduos tem particularidades inerentes ao serviço, o que condiciona a sua representação.

A eficiência dos percursos de recolha resultantes do *Network Analyst* é influenciada pelos dados de entrada introduzidos. Os dados de entrada devem ser cautelosamente aferidos com base em indicadores de recolha, indicadores que, sempre que possível, devem basear-se em levantamentos de campo e tratamentos estatísticos adequados.

Desenvolvido para solucionar problemas de diferente complexidade, o *Network Analyst* constitui uma ferramenta de apoio à tomada de decisão relativamente ao trajecto mais apropriado segundo um determinado objectivo.

keywords

Transportation problems, network analysis, geographical information systems, database, road, waste collection routes, collection indicators, routes optimization, *Network Analyst*, *Vehicle Routing Problem*

abstract

The high cost of the collection operation and the obligation to comply with provisions of communitarian and national legal instruments, in particular the implementation of selective collection routes which promote recycling and recovery, are at the origin of the study for solutions which allow the enhancement of the waste collection operation.

This paper aims to give a contribution for the enhancement of the urban waste collection, using software developed to calculate enhanced routes between points of interest – *Network Analyst*, supported by a geographical information system platform.

The representation of the waste collection operation constitutes a transportation problem, being its solution based on the network analysis.

Nowadays, we are observing the expansion of the geographical information systems as a potential management tool for the waste collection infrastructures because, on one hand, they allow the manipulation of georeferenced data from several sources and, on the other hand, they can work as a support interface for waste collection routes calculation.

Based on the analysis of the *Network Analyst* application in a case study of route determination for urban waste collection, it was concluded that the application in question is an instrument applicable to the waste collection service, but with some limitations, because the waste collection operation has some singularities inherent to the service, which influences its representation.

The efficiency of the collection routes resulting from *Network Analyst* is influenced by the inserted input data. The inputs must be carefully checked based on collection indicators, which, whenever possible, should be based on field surveys and adequate statistical treatments.

Developed to solve problems of different complexity levels, the *Network Analyst* constitutes a support tool for the decision making process in what concerns the most adequate way according to a certain objective.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Quadros	vi
Lista de abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivações	2
1.2 Objectivos do trabalho	3
1.3 Organização de conteúdos	3
2 Gestão de resíduos e Sistemas de Informação Geográfica.....	5
2.1 Gestão de resíduos.....	5
2.1.1 Enquadramento legal.....	5
2.1.2 Caracterização da operação de recolha de resíduos.....	10
2.1.3 Optimização da recolha de resíduos	12
2.1.3.1 Indicadores de gestão de resíduos.....	13
2.1.3.2 Recolha de informação	13
2.1.3.3 Especificidades na definição de circuitos de recolha	15
2.2 Sistemas de Informação Geográfica	15
2.2.1 Enquadramento legal.....	16
2.3 SIG na gestão do ambiente	18
2.3.1 SIG e recolha de resíduos.....	19
3 Problemas de percursos de veículos	21
3.1 Grafos e redes	22
3.2 Problemas clássicos de percursos	24
3.2.1 Problema do Caixeiro-viajante	24
3.2.2 Problema do Carteiro Chinês	24
3.2.3 Problema de Múltiplos Caixeiros-Viajantes.....	25
3.2.4 Problema Clássico de percursos de Veículos.....	25
3.2.5 Problema de percursos de Veículos com Múltiplos Depósitos	25
3.2.6 Problema de percursos de Veículos com Janelas Temporais	26
3.3 Soluções para os problemas clássicos de percursos de veículos	26
3.3.1 Métodos exactos.....	27
3.3.2 Métodos heurísticos.....	29
3.3.3 Métodos metaheurísticos	30
3.3.3.1 Solução do <i>VRP</i>	30
3.3.3.2 Solução do <i>VRPTW</i>	31
3.4 Soluções e aplicações disponíveis no mercado	31
3.4.1 TransCAD da Caliper Corporation.....	31

3.4.2	ArcLogistics Route da ESRI	32
3.4.3	GeoMedia Transportation Manager da Intergraph	32
3.4.4	Routesmart da Routesmart Technologies Inc.	32
3.4.5	FleetRoute da CIVIX L.L.C.	33
3.4.6	GISMAT RSU da PH Informática.....	33
3.4.7	AutoCAD e SIG.....	33
4	Aplicações de análise de redes	34
4.1	Organização da informação em ambiente <i>ArcGIS</i>	35
4.2	Rede viária (<i>Network Dataset</i>).....	36
4.2.1	Elementos e atributos da rede viária	36
4.2.2	Validação da rede viária	37
4.2.3	Outras especificações exigidas pelo <i>Network Analyst</i>	37
4.3	Localizações na rede (<i>Network Locations</i>)	40
4.4	Aplicações do <i>Network Analyst</i>	42
4.4.1	Percursos óptimos (Route)	42
4.4.2	Áreas de influência (Service Area)	43
4.4.3	Instalação mais próxima (Closest facility)	44
4.4.4	Matriz de custos OD (OD Cost Matrix)	45
4.4.5	Problema de percursos de veículos (vehicle routing problem)	46
4.4.5.1	Objectivo do <i>VRP</i>	46
4.4.5.2	Aplicação do <i>VRP</i>	47
4.4.5.3	Especificidades dos percursos	48
4.5	Algoritmos usados pelo <i>Network Analyst</i>	50
4.5.1	Instalação mais próxima, matriz de custos OD e área de influência (Closest Facility, OD Cost Matrix, Service Area)	51
4.5.2	Percorso óptimo (Route).....	51
4.5.3	Problema de percursos de veículos (Vehicle Routing Problem)	52
5	Casos de estudos	53
5.1	Informação de base	53
5.2	Sistema de gestão de RU na RAM	55
5.2.1	Recolha indiferenciada e selectiva de resíduos	55
5.2.2	Transferência de resíduos na RAM	55
5.2.3	Tratamento de resíduos na RAM.....	57
5.3	Modelos de gestão de recolha	57
5.3.1	Caracterização dos actuais circuitos	58
5.4	Definição da rede viária (<i>network dataset</i>)	62
5.4.1	Digitalização da rede viária.....	62
5.4.2	Velocidade	64
5.4.3	Validação da rede viária	65

5.4.4	Construção da Network Dataset.....	66
5.5	Preparação dos pontos de recolha (<i>network locations</i>)	66
5.5.1	Pontos de recolha (<i>orders</i>)	66
5.5.1.1	Especificidades dos pontos de visita	67
5.5.1.2	Introdução dos pontos de recolha de resíduos.....	68
5.5.2	Locais de partida dos circuitos (<i>depots</i>) e instalações de descarga (<i>depots, route renewals</i>)	69
6	Resultados e Discussão	71
6.1	Matriz de custos OD (<i>OD Cost Matrix</i>) em problemas de localização de parques de viaturas e instalações de gestão de resíduos.....	71
6.2	Áreas de influência (<i>Service Area</i>) em problemas de localização de instalações de gestão de resíduos.....	73
6.3	Problema de percursos de veículos (<i>Vehicle Routing Problem</i>) relativo a recolha de resíduos indiferenciados	75
6.3.1	Pressupostos considerados na aplicação do VRP.....	75
6.3.2	Resultados preliminares	77
6.3.2.1	Ensaio dos parâmetros tempo e velocidade.....	77
6.3.2.2	Ensaio do modelo de aproximação da viatura ao ponto de visita	79
6.3.3	Resultados de percursos de recolha de resíduos (VRP)	81
6.3.3.1	Ensaio de percursos de recolha de resíduos: Caso 1	82
6.3.3.2	Ensaio de percursos de recolha de resíduos: Caso 2.....	85
6.3.3.3	Ensaio de percursos de recolha de resíduos: Caso 3.....	88
6.3.4	Resultados da aplicação do VRP	90
7	Conclusão	93
7.1	Conclusões	93
7.2	Recomendações	96
7.3	Sugestões para trabalho futuro.....	97
	Referências bibliográficas	98

Índice de Figuras

Figura 3.1 – Grafos.....	23
Figura 3.2 – Exemplo da aplicação do algoritmo de <i>Dijkstra</i> (Karadimas, 2007)	28
Figura 4.1 – Ambiente <i>ArcCatalog</i>	34
Figura 4.2 – Ambiente <i>ArcMap</i> e <i>ArcToolbox</i>	34
Figura 4.3– Conectividade da rede viária.....	38
Figura 4.4 – Conectividade apenas nas extremidades das linhas: não há cruzamento de nível....	39
Figura 4.5 – Conectividade em qualquer vértice das linhas: há cruzamento de nível.....	39
Figura 4.6 – Erros comuns no estabelecimento da conectividade das redes.....	39
Figura 4.7 – Atributos de elevação: intersecção ao mesmo nível	39
Figura 4.8 – Atributos de elevação: intersecção a diferentes níveis.....	40
Figura 4.9 – Aproximação do veículo ao ponto a percorrer	41
Figura 4.10 – Problemas solucionados com o <i>Network Analyst</i>	42
Figura 4.11 – Propriedades da <i>layer Route</i>	43
Figura 4.12 – Propriedades da <i>layer Service Area</i>	44
Figura 4.13 – Propriedades da <i>layer Closest Facility</i>	45
Figura 4.14 – Propriedades da <i>layer OD Cost Matrix</i>	46
Figura 4.15 – Informação constante na tabela de conteúdos do <i>VRP</i>	47
Figura 4.16 – Propriedades do objecto de análise da rede <i>route</i>	49
Figura 4.17 – Propriedades da <i>layer VRP</i>	50
Figura 4.18 – Adição de percursos: (a) modo de criação do circuito; (b) <i>VRP</i> com um circuito; (c) <i>VRP</i> com três circuitos	50
Figura 5.1 – Região Autónoma da Madeira	54
Figura 5.2 – Distribuição espacial da produção de resíduos por concelho (2008)	55
Figura 5.3 - Destino dos resíduos indiferenciados.....	56
Figura 5.4 - Atributos da rede viária	62
Figura 5.5 – Especificidades da rede viária para construção da <i>Network Dataset</i>	64
Figura 5.6 – Atributos dos pontos de recolha de resíduos indiferenciados	67
Figura 5.7 – Preparação dos pontos de recolha de resíduos	68
Figura 5.8 – Propriedades de análise das <i>Network Locations</i>	69
Figura 6.1 – Resultado gráfico da solução <i>OD Cost Matrix</i>	72
Figura 6.2 – Resultado alfa-numérico da solução <i>OD Cost Matrix</i>	72
Figura 6.3 – Análise de áreas de influência das estações de transferência.....	74
Figura 6.4 – Análise de área de influência da estação de tratamento.....	74
Figura 6.5 – Atributos por percurso.....	76
Figura 6.6 – Resultados preliminares: Percurso 1	77
Figura 6.7 – Resultados preliminares: Percurso 2	78

Figura 6.8 – Lado de aproximação da viatura ao ponto de recolha não definido	79
Figura 6.9 – Lado direito de aproximação da viatura ao ponto de recolha.....	80
Figura 6.10 – Lado esquerdo de aproximação da viatura ao ponto de recolha	80
Figura 6.11 – Aplicação de um <i>VRP</i> com vários circuitos (Caso 1)	82
Figura 6.12 – Aplicação de vários <i>VRP</i> , cada um com um circuito (Caso 1)	83
Figura 6.13 – Aplicação de um <i>VRP</i> com vários circuitos (Caso 2)	85
Figura 6.14 – Aplicação de vários <i>VRP</i> , cada um com um circuito (Caso 2)	86
Figura 6.15 – Aplicação de um <i>VRP</i> com vários circuitos (Caso 3)	88
Figura 6.16 – Aplicação de vários <i>VRP</i> , cada um com um circuito (Caso 3)	89

Índice de Quadros

Quadro 3.1 – Resultado da aplicação do algoritmo de <i>Dijkstra</i> (Karadimas, 2007)	29
Quadro 5.1 – Caracterização demográfica da RAM (2008)	54
Quadro 5.2 – Caracterização dos actuais circuitos de recolha indiferenciada do concelho de Santa Cruz	60
Quadro 5.3 – Indicadores de execução dos circuitos de recolha indiferenciada do concelho de Santa Cruz.....	61
Quadro 5.4 – Atributos da rede viária	63
Quadro 5.5 – Atributos dos pontos de recolha de resíduos indiferenciados	67
Quadro 5.6 – Atributos dos locais de partida e chegada	70
Quadro 6.1– Matriz de distâncias.....	73
Quadro 6.2 – Síntese de resultados preliminares	78
Quadro 6.3 – Comparação da impedância de acordo com a aproximação da viatura.....	80
Quadro 6.4 – Aplicação de um <i>VRP</i> com vários circuitos (Caso 1).....	84
Quadro 6.5 – Aplicação de vários <i>VRP</i> , cada um com um circuito (Caso 1).....	84
Quadro 6.6 – Aplicação de um <i>VRP</i> com vários circuitos (Caso 2).....	87
Quadro 6.7 – Aplicação de vários <i>VRP</i> , cada um com um circuito (Caso 2).....	87
Quadro 6.8 – Aplicação de um <i>VRP</i> com vários circuitos (Caso 3).....	89
Quadro 6.9 – Aplicação de vários <i>VRP</i> , cada um com um circuito (Caso 3).....	89
Quadro 6.10 – Número de circuitos de recolha indiferenciada	90
Quadro 6.11 – Viaturas de recolha necessárias	91
Quadro 6.12 – Recursos humanos afectos à recolha.....	91
Quadro 6.13 – Distâncias percorridas anualmente (km).....	92
Quadro 6.14 – Síntese conclusiva	92
Quadro 7.1 – Síntese dos elementos necessários à representação de circuitos de recolha pelo <i>Network Analyst</i>	94
Quadro 7.2 – Representação do declive na rede viária.....	97

Lista de abreviaturas

APA	- Agência Portuguesa do Ambiente
CARP	- <i>Capacitated Arc Routing Problem</i>
CPP	- <i>Chinese Postman Problem</i>
CPRS	- Centro de Processamento de Resíduos Sólidos
D	- Diurno
ET	- Estação de transferência
ETF	- Estação de transferência do Funchal
ETMS	- Estação de Tratamento da Meia Serra
ETZL	- Estação de Transferência da Zona Leste
ETZO	- Estação de Transferência da Zona Oeste
GPS	- Global System Position
IA	- Instituto do Ambiente
IG	- Informação geográfica
INR	- Instituto dos Resíduos
LER	- Lista Europeia de Resíduos
MTSP	- <i>Multiple Travelling Salesman Problem</i>
MDVRP	- <i>Multi-Depot Travelling Salesman Problem</i>
N	- Nocturno
OD	- Origem-Destino
PDA	- Assistente Pessoal Digital
PERSU II	- Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos II
PV	- Parque de viaturas
RSU	- Resíduos sólidos urbanos
RU	- Resíduos urbanos
RUB	- Resíduos urbanos biodegradáveis
RAM	- Região Autónoma da Madeira
SIRAPA	- Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente
SIRER	- Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos
TSP	- <i>Travelling Salesman Problem</i>
VRP	- <i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPTW	- <i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>
VG	- Viatura grande
VP	- Viatura pequena

1 INTRODUÇÃO

Numa sociedade na qual a prevenção e racionalização são palavras de ordem, o transporte representa um desafio de eficiência.

O desenvolvimento de técnicas de optimização e da tecnologia computacional muito têm contribuído para a difusão e adopção de aplicações informáticas sofisticadas cujo objectivo é a resolução de problemas de transporte, que permitam uma representação realista dos problemas encontrados no dia-a-dia.

Uma das dificuldades de modelar e resolver um problema de cálculo de percursos advém da quantidade de parâmetros que têm influência no problema.

As aplicações para resolução de problemas de transporte entram no domínio da investigação operacional, ramo da matemática aplicada que faz uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos na ajuda à tomada de decisões. A investigação operacional é usada sobretudo para analisar sistemas complexos do mundo real, tipicamente com o objectivo de melhorar ou optimizar o seu desempenho.

Assim, para melhor entendimento dos aspectos mais relevantes num problema de cálculo de percursos é fundamental identificar, modelar e classificar o problema, determinar as suas características mais relevantes e a sua relação com os outros problemas. Ter uma visão sistémica do processo é fundamental para uma tomada de decisão de qualidade.

Os sistemas de informação geográfica (SIG) e a análise de redes são áreas em evolução, caracterizadas por significativos avanços científicos. A análise de redes baseia-se na determinação do percurso de menor custo sobre um conjunto de arcos e nós, tendo em consideração determinadas restrições e custos. Trata-se de um problema que está presente num conjunto de situações práticas entre as quais as redes de transporte.

A aplicação das potencialidades dos SIG à análise de redes tem-se revelado eficiente. A vantagem de utilizar um SIG na análise de redes está na sua capacidade de associar a cada arco e nó da rede um conjunto de atributos que podem ser manipulados e visualizados graficamente.

Além disso, alguns SIG permitem a integração de algoritmos, o que possibilita a sua aplicação imediata em problemas de cálculo de distância e tempo percorridos num percurso ou na determinação do percurso de menor custo entre dois pontos de interesse, por exemplo. De facto, o uso de bases de dados geográficas em ambiente SIG, associadas a interfaces gráficas interactivas, proporciona um fácil manuseamento e análise dos dados.

A operação de recolha tem um peso significativo no custo global da gestão dos resíduos urbanos (RU), podendo representar 40% a 70% dos custos totais de gestão. Assim, numa óptica de aumento da eficiência da operação de recolha de resíduos, os actuais esquemas de recolha, quer indiferenciada, quer selectiva, exigem atenção constante e contínua de modo a identificar oportunidades de melhoria do serviço.

A atenção requerida pelos actuais esquemas de recolha aliada à necessidade de dar resposta às metas de valorização multimaterial e valorização orgânica impostas

legalmente tornam ainda mais urgente o desenvolvimento de modos mais intensos de recolhas selectivas.

Perspectivando uma melhoria do serviço e de ganhos de eficiência é fundamental desenvolver estratégias de optimização da operação de recolha de resíduos urbanos.

Os SIG e bases de dados geográficas constituem ferramentas que oferecem mais valias quando aplicadas à operação de recolha de resíduos urbanos, designadamente no que diz respeito ao registo cadastral de contentores de recolha de resíduos urbanos, à dinâmica de enchimento dos contentores e determinação dos percursos de recolha de resíduos.

O *software Network Analyst* do *ArcGIS* possibilita a exploração da análise de redes e, uma vez que funciona numa plataforma SIG, permite a visualização dos resultados em ambiente SIG.

1.1 MOTIVAÇÕES

A recolha de resíduos é a componente mais dispendiosa do custo global da gestão integrada dos resíduos urbanos, sendo crucial equacionar o modo como é feita actualmente.

As fontes difusas de produção de resíduos e o aumento significativo dos quantitativos produzidos criam problemas permanentes de apoio logístico, tornando pesados os custos directos em combustível e mão-de-obra.

Numa perspectiva de eficiência e de redução de custos, os desafios da operação de recolha colocam-se por um lado, ao nível da optimização dos esquemas de recolha já implantados, como será o caso da generalidade das recolhas indiferenciadas e selectivas que cobrem praticamente toda a população; e, por outro, ao nível do reforço dos esquemas de recolha de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB), seguindo deste modo a linha de actuação estratégica consagrada no PERSU II, publicado pela Portaria 187/2007, de 12 de Fevereiro.

A adopção de esquemas de recolha selectiva de resíduos como medida necessária para a promoção de uma reciclagem de alta qualidade é consagrada com a publicação da Directiva 2008/98/CE, de 19 de Novembro de 2008, que estabelece as medidas de protecção do ambiente e da saúde humana (Directiva-Quadro dos Resíduos).

Por estas razões, numa perspectiva futura, é urgente desenvolver metodologias e instrumentos de gestão que permitam optimizar a operação de recolha, quer ao nível da identificação e localização dos pontos de recolha e das frequências de recolha, quer ao nível da definição dos circuitos de recolha propriamente ditos.

Pretende-se que o processo de optimização tenha efeitos positivos, por um lado, no que diz respeito à redução dos custos da operação e, por outro, na mitigação das emissões de poluentes para a atmosfera.

1.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objectivo contribuir para a optimização da recolha de resíduos urbanos, com recurso aos SIG.

Para o efeito, foi usada uma ferramenta de *software* – o *Network Analyst* – desenvolvida para calcular percursos optimizados entre pontos de interesse. Esta ferramenta é suportada numa plataforma SIG – o *ArcView*, o que possibilita a utilização de dados georeferenciados, designadamente arruamentos e locais onde estão localizados os contentores de resíduos.

Recorrendo a um caso de estudo, pretende-se explorar e aprofundar o contributo que esta ferramenta pode oferecer na implementação de circuitos de recolha de resíduos.

Assim, o objectivo do presente trabalho é avaliar os dados de entrada necessários e as conclusões da aplicação do *software* na determinação de percursos de recolha de resíduos urbanos (RU) localizados espacialmente em locais estratégicos de deposição de resíduos.

Especificamente, os objectivos do trabalho incluem:

- a) O levantamento cadastral da rede viária, pontos de recolha de resíduos, locais de saída e chegada das viaturas (parques de viaturas, por exemplo) e instalações de gestão de resíduos (estações de transferência, por exemplo), bem como os elementos geográficos e alfanuméricos respeitantes às bases de dados necessárias;
- b) A validação das bases de dados, designadamente correcção topológica da rede viária;
- c) A análise de sensibilidade do *Network Analyst* relativamente a alguns parâmetros e impacto sobre as soluções obtidas;
- d) Ensaio da aplicação do *software* nas suas diferentes funcionalidades, entre as quais a aplicação do problema de cálculo de percursos à recolha de resíduos urbanos;
- e) Análise dos resultados obtidos;

Entre os objectivos do trabalho pretende-se ainda perceber o comportamento do *software* quando aplicado num cenário de recolha integrada comparativamente com uma recolha de âmbito municipal. Para o efeito, serão analisados os resultados da aplicação da ferramenta de cálculo de percursos em diferentes cenários organizacionais estratégicos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DE CONTEÚDOS

O presente documento está organizado em sete capítulos. No primeiro capítulo faz-se uma introdução ao tema em discussão e apresentam-se o objectivo geral e objectivos específicos do trabalho. Faz-se ainda referência à abordagem seguida ao longo do desenvolvimento da tese.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do tema gestão de resíduos urbanos. É feito o enquadramento legal do tema e apresentados os instrumentos estratégicos da gestão de resíduos urbanos. São ainda descritas as operações de gestão de resíduos, com especial ênfase para a operação de recolha de resíduos urbanos.

Ainda no segundo capítulo é feita uma abordagem aos sistemas de informação geográfica, apresentando-se a sua importância como instrumento de criação, armazenamento, edição e manipulação de bases de dados e como plataforma de suporte de aplicações de cálculo de percursos.

No terceiro capítulo apresenta-se o enquadramento bibliográfico dos principais problemas e soluções de cálculo de percursos de veículos.

O quarto capítulo apresenta detalhadamente o *Network Analyst*, designadamente as exigências necessárias para que a ferramenta possa ser aplicada e o tipo de problemas de cálculo de percursos passíveis de solucionar.

No capítulo quinto é apresentado um caso de estudo da aplicação do *Network Analyst* num estudo de optimização de recolha de resíduos urbanos. Descreve-se a metodologia usada no estudo de optimização referido, designadamente modo de preparação das bases de dados e parâmetros utilizados. São descritos alguns ensaios que permitiram avaliar o comportamento do *software*. Além disso, exemplificam-se os problemas de percursos de veículos passíveis de solucionar com o *Network Analyst*.

No sexto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados da aplicação do *Network Analyst* à operação de recolha indiferenciada de resíduos.

Por fim, o sétimo capítulo apresenta uma síntese conclusiva do trabalho bem como sugestões de melhoria com o intuito de adequar especificamente a ferramenta à operação de recolha de resíduos urbanos. São ainda apresentadas as potencialidades e limitações do *software*.

2 GESTÃO DE RESÍDUOS E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

No presente capítulo é feito o enquadramento legal da gestão de resíduos urbanos, apresentando-se os principais instrumentos legais estratégicos de gestão de resíduos.

Faz-se ainda uma introdução ao tema dos sistemas de informação geográfica, apresentando a sua importância como instrumento de criação, armazenamento, edição e manipulação de dados geográficos com características alfanuméricas associadas.

2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS

A gestão dos resíduos assume particular importância no contexto do apelo à defesa do ambiente exigindo grande esforço na pesquisa de soluções que contrariem a degradação ambiental a que se vai assistindo por todo o mundo. Embora nos últimos anos tenha havido um desenvolvimento significativo de infra-estruturas de gestão de resíduos em geral, eles continuam a ser um problema a que as sociedades contemporâneas têm de fazer face. Contudo, actualmente os resíduos devem ser vistos também como um recurso.

Resíduos são genericamente definidos como qualquer substância ou objecto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer. Uma fracção considerável dos resíduos produzidos nas sociedades modernas diz respeito a resíduos urbanos, isto é, resíduos provenientes de habitações bem como outros resíduos que, pela sua natureza ou composição, sejam semelhantes aos resíduos provenientes de habitações (Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro).

De acordo com o disposto na Directiva n.º 2008/98/CE, de 19 de Novembro de 2008 (Directiva-Quadro dos Resíduos), a gestão de resíduos diz respeito à recolha, transporte, valorização e eliminação de resíduos, incluindo a supervisão destas operações e a manutenção dos locais de eliminação após encerramento.

2.1.1 ENQUADRAMENTO LEGAL

Em Portugal a identificação e classificação dos resíduos é feita segundo a sua origem, de acordo com a Lista Europeia de Resíduos, vulgarmente designada por LER. A LER, publicada pela Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março, assegura a harmonização do normativo vigente em matéria de identificação e classificação de resíduos, ao mesmo tempo que visa facilitar um perfeito conhecimento pelos agentes económicos do regime jurídico a que estão sujeitos.

O Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro estabelece o regime geral da gestão de resíduos, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril, e a Directiva n.º 91/689/CEE, do Conselho, de 12 de Dezembro.

Este documento legal define os princípios gerais de gestão de resíduos, designadamente:

- Princípio da auto-suficiência – as operações de gestão de resíduos devem decorrer preferencialmente em território nacional, reduzindo ao mínimo possível os movimentos transfronteiriços de resíduos;
- Princípio da responsabilidade pela gestão – a gestão do resíduo constitui parte integrante do seu ciclo de vida, sendo da responsabilidade do respectivo produtor, à excepção dos resíduos urbanos cuja produção diária não exceda 1100 l por produtor, caso em que a respectiva gestão é assegurada pelos municípios; em caso de impossibilidade de determinação do produtor do resíduo, a responsabilidade pela respectiva gestão recai sobre o seu detentor;
- Princípios da prevenção e redução – é objectivo prioritário da política de gestão de resíduos evitar e reduzir a sua produção bem como o seu carácter nocivo, devendo a gestão de resíduos evitar também ou, pelo menos, reduzir o risco para a saúde humana e para o ambiente causado pelos resíduos sem utilizar processos ou métodos susceptíveis de gerar efeitos adversos sobre o ambiente, nomeadamente através da criação de perigos para a água, o ar, o solo, a fauna e a flora, perturbações sonoras ou odoríficas ou de danos em quaisquer locais de interesse e na paisagem.
- Princípio da hierarquia das operações de gestão de resíduos – a gestão de resíduos deve assegurar que à utilização de um bem sucede uma nova utilização ou que, não sendo viável a sua reutilização, se procede à sua reciclagem ou ainda a outras formas de valorização; a eliminação definitiva de resíduos, nomeadamente a sua deposição em aterro, constitui a última opção de gestão, justificando-se apenas quando seja técnica ou financeiramente inviável a prevenção, a reutilização, a reciclagem ou outras formas de valorização;
- Princípio da responsabilidade do cidadão – os cidadãos contribuem para a prossecução dos princípios e objectivos referidos nos artigos anteriores, adoptando comportamentos de carácter preventivo em matéria de produção de resíduos, bem como práticas que facilitem a respectiva reutilização e valorização;
- Princípio da regulação da gestão de resíduos – a gestão de resíduos é realizada de acordo com os princípios gerais fixados nos termos do presente decreto-lei e demais legislação aplicável e em respeito dos critérios qualitativos e quantitativos fixados nos instrumentos regulamentares e de planeamento;
- Princípio da equivalência – o regime económico e financeiro das actividades de gestão de resíduos visa a compensação tendencial dos custos sociais e ambientais que o produtor gera à comunidade ou dos benefícios que a comunidade lhe faculta, de acordo com um princípio geral de equivalência;

Segundo o princípio da responsabilidade pela gestão, a gestão de um resíduo constitui parte integrante do seu ciclo de vida, sendo da responsabilidade do respectivo produtor, com excepção dos resíduos urbanos cuja produção diária não exceda 1100l por produtor, caso em que a respectiva gestão é assegurada dos municípios.

O instrumento estratégico director da gestão de resíduos sólidos urbanos é o PERSU II, publicado em Diário da República através da Portaria n.º 187/2007, de 12 de Fevereiro.

Este documento define as propriedades e estabelece as metas que se pretendem atingir para o período de 2007 a 2016 em matéria de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU).

O PERSU II atribui importante papel dos cidadãos no sector dos resíduos, cada vez menos como produtores passivos e mais como consumidores responsáveis, com influência clara no domínio da prevenção e como agentes decisivos da gestão de resíduos, designadamente por via da adesão aos esquemas de recolha selectiva.

A estratégia de qualificação e optimização da gestão de resíduos preconizada no Eixo III do PERSU II equaciona como medida a optimização dos Sistemas de Gestão de RSU por via de um processo de reconfiguração e integração. Pretende esta medida a análise da agregação dos actuais Sistemas plurimunicipais de gestão de RSU, com base em critérios de eficiência, promovendo-se sinergias e economias de escala, a par de uma maior eficácia e eficiência da gestão de resíduos.

Segundo o PERSU II a reconfiguração dos Sistemas de Gestão de RSU deve ser encarada na dupla perspectiva de, por um lado, gerar economias de escala que permitam garantir a sua sustentabilidade num quadro de custos, tanto quanto possível, homogéneo em todo o País e, por outro, verticalizar a gestão, de modo a racionalizar, para os diferentes fluxos de resíduos, a sequência de operações numa perspectiva integrada.

Face às características das operações de gestão de resíduos, a obtenção de economias de escala é um ponto crítico, tornando necessário garantir que esse efeito se repercute em toda a cadeia do processo.

Deste modo, resultam como critérios fundamentais na agregação de Sistemas a dimensão do ponto de vista da quantidade de resíduos produzidos e a extensão territorial, esta com impacte sobretudo nas operações de recolha.

Assim, de acordo com o disposto no PERSU II, a agregação de Sistemas com continuidade geográfica deverá assentar nos seguintes princípios:

- Manutenção dos sistemas correspondentes às áreas metropolitanas, com ajustamentos da sua composição, em função da possível agregação de Municípios que se situem geograficamente na sua continuidade territorial;
- Integração das operações de recolha de acordo com os Municípios envolvidos;
- Procura do equilíbrio adequado entre a concentração de empresas, como forma de ganho de efeito de escala e harmonização de tarifas, e, por outro lado, a salvaguarda dos princípios de concorrência do mercado.

Outra das medidas preconizadas no Eixo III do PERSU II diz respeito ao reforço dos Sistemas ao nível de infra-estruturas e equipamentos. O reforço dos Sistemas em infra-estruturas e equipamentos de suporte à deposição e recolha selectivas, à reciclagem (valorização material), outras formas de valorização e, por conseguinte, à redução da deposição dos resíduos não passíveis de valorização em aterro (entendendo-se estes como os resíduos que resultam de operações de tratamento e valorização instaladas em dado Sistema de Gestão), a par do necessário reforço dos meios e plataformas logísticas destinados à maior eficácia de utilização das infra-estruturas, são factores que contribuem para a implementação da estratégia.

Para o efeito, devem ser tidas em conta as seguintes linhas de actuação: (a) estabelecimento de um novo procedimento metodológico para a amostragem e caracterização dos RSU, fracções indiferenciada e provenientes da recolha selectiva, (b) clarificação do modo de cálculo das taxas de reciclagem, (c) aproveitamento de sinergias entre sistemas de recolha indiferenciada e selectiva por via de uma gestão integrada, (d) reforço das redes de recolha selectiva multimaterial, (e) optimização da operação de triagem, (f) incorporação progressiva dos actuais refugos da triagem, nos processos de reciclagem, (g) reforço da valorização orgânica de RUB recolhidos selectivamente, (h) implementação do tratamento mecânico-biológico, (i) reforço da capacidade de utilização da valorização através do processo de incineração de alto rendimento, (j) reforço dos meios logísticos e (k) qualificação do pessoal, investimento em novas tecnologias e promoção de investigação e desenvolvimento.

Entre as linhas de actuação para o reforço dos Sistemas ao nível de infra-estruturas e equipamentos o PERSU define:

- O aproveitamento de sinergias nos diferentes sistemas de recolha indiferenciada e selectiva, que devem ser geridos de forma integrada, com base em efeitos de escala resultantes de optimização espacial/territorial dos diferentes tipos de recolha e da afectação de meios humanos e técnicos (equipamentos e veículos), tendo em vista a minimização dos elevados custos e ganhos resultantes da articulação das diversas recolhas. Uma recolha integrada exige o repensar dos modos de optimização, evitando-se a duplicação dos sistemas de recolha, mas sim a sua redução significativa, com base na afectação dos mesmos meios aos dois tipos de recolha repensados e optimizados sob o ponto de vista técnico e espacial. Para o efeito, os Sistemas de Informação Geográfica são utensílios essenciais de gestão.
- O reforço das redes de recolha selectiva multimaterial (porta-a-porta, ecopontos, ecocentros, mistos), sendo para este efeito essencial a realização de estudos e de “experiências piloto” em áreas com diferentes características urbanísticas, culturais e sociais – as quais devem abarcar a recolha selectiva de RUB – de modo a poder coligir-se informação concreta sobre o custo-eficácia de cada sistema de recolha selectiva e a poder fundamentar-se a opção dominante por um deles, ou justificar um sistema misto, atendendo às especificidades de cada Sistema e região. As soluções optimizadas dos diferentes tipos de recolha, incluindo a respectiva área de influência espacial, devem, assim, basear-se numa análise de custo-eficácia, validadas previamente, na prática, por “experiências piloto” antes da respectiva generalização.
- O reforço da valorização orgânica (nomeadamente pela digestão anaeróbia e/ou compostagem) de RUB provenientes da recolha selectiva.

A Directiva n.º 2008/98/CE, de 19 de Novembro de 2008, (Directiva-Quadro dos Resíduos) estabelece as medidas de protecção do ambiente e da saúde humana, prevenindo ou reduzindo os impactos adversos decorrentes da geração e gestão de resíduos, diminuindo os impactos gerais da utilização dos recursos e melhorando a eficiência dessa utilização.

Este documento estabelece a hierarquia dos resíduos enquanto princípio geral da legislação e da política de prevenção e gestão de resíduos:

- 1) Prevenção e redução;
- 2) Preparação para a reutilização;
- 3) Reciclagem;
- 4) Outros tipos de valorização, por exemplo a valorização energética;
- 5) Eliminação.

Numa perspectiva de promoção de reciclagem de alta qualidade, a Directiva-Quadro dos Resíduos exerce pressão ao nível da operação de recolha ao consagrar que os Estados-Membros devem tomar as medidas necessárias para promover a reciclagem adoptando para esse fim sistemas de recolha selectiva de resíduos, sempre que isso seja viável e adequado de um ponto de vista técnico, ambiental e económico, a fim de garantir os padrões de qualidade indispensáveis para os sectores de reciclagem em causa.

Para planear e gerir de forma eficiente os sistemas de gestão de resíduos é fundamental ter conhecimento dos quantitativos de resíduos, bem como das suas características. Dimensionar o tipo, dimensão e localização das infra-estruturas de gestão de resíduos, bem como necessidades de mão-de-obra, exige ter conhecimento das quantidades e composição dos resíduos gerados ao longo do tempo.

Até à publicação do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, a quantificação e caracterização de resíduos urbanos era efectuada por meio de mapas de registo de resíduos sólidos urbanos aprovados com a publicação da Portaria n.º 768/88, de 30 de Novembro.

No seguimento da publicação do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, e de acordo com o disposto no seu artigo 45.º, é criado o Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos (SIRER), que preconiza a disponibilização, por via electrónica, de um mecanismo de registo e acesso a dados sobre resíduos, substituindo, deste modo, os antigos mapas de registo de resíduos.

Deste modo, os procedimentos de registo e gestão de informação sobre resíduos existentes até à data sofreram uma adaptação legislativa, na óptica da sua simplificação e desmaterialização, surgindo como uma consequência do desenvolvimento dos meios tecnológicos, que impõe o recurso a modelos operativos de registo de informação mais evoluídos, com uma interacção fácil, rápida e segura de dados de distinta proveniência, permitindo ainda agregar toda a informação relativa aos resíduos produzidos e importados para o território nacional e as entidades que operam no sector dos resíduos.

A criação de uma nova entidade nacional responsável pelas questões ambientais – a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), que resultou da fusão do Instituto do Ambiente (IA) e do Instituto de Resíduos (INR), levou à criação de um novo sistema de registo electrónico – Sistema Integrado de Registo da APA (SIRAPA).

2.1.2 CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RECOLHA DE RESÍDUOS

De acordo com a legislação em vigor, aprovada pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, a recolha de resíduos é a operação de apanha, selectiva ou indiferenciada, de triagem e ou mistura de resíduos com vista ao seu transporte.

A operação de recolha dos resíduos é organizada em circuitos de recolha. Um circuito de recolha de resíduos define-se como um trajecto que obedece a um planeamento prévio em termos de sequência de pontos de recolha (ou ruas a percorrer), dias e horário. Em função dos quantitativos a recolher um circuito pode completar-se numa só volta, quando as quantidades a recolher ocupam um volume idêntico ou inferior à capacidade do veículo, ou completar-se em mais de uma volta, quando os resíduos produzidos nesse circuito possuem um volume superior à capacidade do veículo (Martinho e Gonçalves, 2000).

A recolha de resíduos pode ser realizada de acordo com horários pré-estabelecidos, com uma periodicidade variável, dependendo da capacidade do equipamento de recolha instalado e das características do meio (rural ou urbano).

As frequências e horários de recolha variam de local para local. As condições locais e as características do serviço podem determinar estes parâmetros. Relativamente à frequência, a recolha pode classificar-se em diária, semanal, bisemanal ou mensal. Em relação ao horário, em diurna ou nocturna.

Os factores a considerar na definição da frequência e horário de recolha são: tipo de recolha (indiferenciada vs selectiva), fluxo de resíduos a recolher, volume de resíduos a recolher, composição dos resíduos urbanos, efeito na taxa de produção, proliferação de vectores de doenças e riscos para a saúde pública, características do aglomerado (urbano, rural), características da rede viária, características do tráfego, condições climáticas (decomposição e cheiros), época do ano, hábitos da população, produtividade e rendimento do serviço, custos.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, fluxo de resíduos designa-se o tipo de produto componente de uma categoria de resíduos transversal a todas as origens, nomeadamente embalagens, electrodomésticos, pilhas, acumuladores, pneus ou solventes. Designa-se fileira de resíduos o tipo de material constituinte dos resíduos, nomeadamente fileira dos vidros, fileira dos plásticos, fileira dos metais, fileira da matéria orgânica ou fileira do papel e cartão.

O princípio do poluidor-pagador, fundamental de qualquer política integrada de gestão de resíduos, permite colocar a obrigação da gestão do resíduo no interveniente que poderá ter maior peso em todo o ciclo de vida do material, incentivando alterações na concepção do produto, maximizando a poupança de matérias-primas e, minimizando a produção de resíduos.

Na prática, a responsabilização do produtor, traduzida na obrigação de retomar e valorizar materiais e na obrigação do cumprimento de metas quantificadas de reutilização/reciclagem, incentiva-o a alterar a concepção do seu produto. Tal estratégia tem geralmente repercussões na eco-eficiência dos produtos (utilização de menores quantidades de matéria-prima ou utilização de materiais recicláveis/reciclados), bem

como no seu "eco-design" (maior facilidade de desmantelamento ou reciclagem, menor conteúdo em substâncias perigosas).

O princípio do poluidor-pagador tem ainda a vantagem de despoletar uma reacção em cadeia, através do ciclo de produção-comércio-consumo-pós-consumo, na qual cada actor passa uma parte da sua responsabilidade para o próximo interveniente na cadeia. Como peça fundamental deste sistema, surgem as entidades gestoras (entidades responsáveis pela gestão de resíduos, tais como a Sociedade Ponto Verde, entidade gestora dos resíduos de embalagem), que permitem unir produtores-distribuidores-consumidores com vista à prossecução de objectivos comuns.

Pelas razões mencionadas tem-se assistido nos últimos anos, em toda a União Europeia, ao surgimento de sistemas do tipo "ponto verde", que em Portugal se materializaram em fluxos das embalagens, pilhas e acumuladores, pneus, equipamentos eléctricos e electrónicos, óleos lubrificantes e veículos.

No que diz respeito aos diferentes tipos de sistemas de recolha de contentores distinguem-se: (a) sistemas de recolha fixo-mecanizados e (b) sistemas de recolha de contentores móveis (Matos, 2007).

Nos sistemas de recolha de contentores fixos (contentores de rodas de 120L a 1100L, contentores enterrados) o veículo sai do parque de viaturas, desloca-se ao primeiro ponto de recolha, recolhe os resíduos, dirigindo-se de seguida para o segundo ponto de recolha, repetindo o procedimento descrito para o primeiro ponto de recolha. Esta operação é repetida tantas vezes quanto o número de pontos de recolha afectos ao circuito.

Nos sistemas de recolha de contentores móveis (contentores de 15m³, instalados em grandes produtores como por exemplo, hotéis), a operação pode efectuar-se de dois modos (Martinho e Gonçalves, 2000):

1. O veículo sai do parque de viaturas com o contentor vazio, desloca-se ao primeiro ponto de recolha, descarrega o contentor vazio e carrega o contentor cheio, dirigindo-se de seguida para o local de destino desses resíduos; regressa ao segundo ponto com o contentor vazio que se encontrava no primeiro ponto, prosseguindo do mesmo modo para os restantes pontos;
2. O veículo sai do parque de viaturas sem nenhum contentor, dirige-se ao primeiro ponto da recolha, carrega o contentor cheio, vai descarregá-lo ao local de destino, e regressa ao primeiro ponto para o colocar no mesmo lugar, de seguida dirige-se ao segundo ponto de recolha efectuando as mesmas operações descritas para o primeiro ponto de recolha.

Tchobanoglous *et al.* (1993) defende que a operação de recolha de resíduos pode subdividir-se em cinco operações unitárias:

- Tempo de e para o parque de viaturas;
- Tempo efectivo de recolha;
- Tempo de transporte;
- Tempo necessário à deposição;
- Tempo fora do circuito ou tempos mortos

O tempo efectivo ou distância de recolha, corresponde ao tempo ou distância que o veículo demora a encher, desde o primeiro até ao último ponto de recolha.

O tempo ou distância de transporte diz respeito ao tempo ou distância desde o último ponto de recolha, quando o veículo atingiu a sua capacidade máxima, até ao local de descarga e regresso ao primeiro ponto de recolha da segunda volta, quando existe.

No tempo de espera no local de deposição inclui-se os tempos necessários à pesagem (entrada e saída), lavagem de rodados e descarga do veículo.

O tempo não produtivo classifica-se em tempo necessário e tempo desnecessário. O tempo necessário é inerente ao circuito – preencher folhas, preparar o veículo, tempo perdido na reparação ou manutenção do equipamento, com o constrangimento do trânsito ou com a refeição. O tempo desnecessário é inerente a tempo abusivo na hora da refeição por exemplo, conversa com amigos, tempo para café.

2.1.3 OPTIMIZAÇÃO DA RECOLHA DE RESÍDUOS

Para um sistema de recolha eficaz do ponto de vista económico e ambiental muito contribui a existência de circuitos otimizados, na medida em que conduzem a um decréscimo dos custos associados, em virtude de serem necessárias menos viaturas e menos pessoal para a sua execução, bem como a uma minimização dos impactes ambientais decorrentes da actividade (diminuição do consumo de combustíveis e das emissões para a atmosfera).

O elevado custo associado à recolha de resíduos conduz a que a optimização de um sistema de recolha de resíduos surja associada a uma óptica de aumento de eficiência e de redução de custos.

O conceito de optimização de circuitos deve estar associado não só à implementação de novos circuitos mas também a circuitos já existentes. Periodicamente, os circuitos já implantados e relativamente estabilizados devem ser reajustados no sentido de se minimizarem os trajectos e os tempos de transporte.

Estão disponíveis ferramentas para desenvolver circuitos de recolha equilibrados e eficientes. Estas ferramentas variam entre técnicas heurísticas e sofisticados programas comerciais de computador.

Circuitos de recolha bem equilibrados são os que conseguem que a equipa de recolha cumpra o circuito no tempo estipulado (sem acumular tempos significativos de horas extraordinárias, ou, ao contrário, sem utilizar em pleno as horas diárias de trabalho da equipa). O processo de determinar circuitos de recolha bem equilibrados é por vezes designado por análise macro-circuito (Rhyner *et al.*, 1995).

Com a optimização da recolha pretende-se minimizar o número de circuitos e tentar evitar que os veículos tenham que percorrer a mesma rua mais do que uma vez. Os processos de planeamento e organização de circuitos para atingir este objectivo são por vezes referidos como análise micro-circuito (Rhyner *et al.*, 1995).

2.1.3.1 INDICADORES DE GESTÃO DE RESÍDUOS

Os indicadores de gestão dizem respeito a valores (rácios) que podem ser estabelecidos entre um conjunto não determinado de variáveis, nomeadamente de estatísticas de gestão, tais como, a população a servir, a quantidade de RSU recolhida, o número de trabalhadores envolvidos, as despesas com o serviço de recolha, números de contentores de recolha selectiva e indiferenciada (Matos, 2009).

O interesse no estudo de indicadores de gestão advém da obrigatoriedade de cumprimento das metas de gestão de resíduos fixadas por documentos legais comunitários e nacionais, e da necessidade de avaliar a evolução do desempenho da gestão de resíduos por parte das diferentes entidades envolvidas, a adopção de medidas de planeamento estratégico, a realização de investimentos em áreas de interesse prioritário.

A informação base necessária à construção de indicadores necessita ter em conta quais os objectivos a que se destina. Neste âmbito é indispensável definir o nível de desagregação espacial (freguesia, município, sistema de gestão, país) e temporal (dia, mês ou ano) e ainda a desagregação por fluxos, isto é, com modelos de gestão próprios (indiferenciados, orgânicos, resíduos de embalagem - vidro, pilhas, papel) – a que essa informação deve ser discriminada (Matos, 2009).

A gestão da operação de recolha é ainda pouco apoiada em indicadores de funcionamento e de custos, essenciais a uma percepção dos factores de melhoria do serviço. Esta situação deverá ser invertida, adoptando-se novas formas de gerir e organizar, conduzindo consequentemente à melhoria da produtividade e do desempenho.

Os dados necessários para o cálculo de indicadores de recolha devem, sempre que possível, basear-se em levantamentos de campo e tratamentos estatísticos adequados.

Tchobanoglous *et al.* (1993) e Stone e Stearns (1969) desenvolvem expressões para determinar indicadores relativos aos sistemas de recolha de contentores fixo-mecanizados.

Por exemplo, o conhecimento de tempos e/ou distâncias de recolha e transporte e velocidades de recolha de resíduos permite o cálculo de indicadores de produtividade úteis para a avaliação da eficiência dos circuitos, comparação entre circuitos e exercícios de simulação.

2.1.3.2 RECOLHA DE INFORMAÇÃO

O uso de ferramentas informáticas e de comunicação é cada vez mais importante no levantamento de indicadores de funcionamento, constituindo um contributo fundamental para a optimização da recolha. Estas ferramentas são particularmente úteis para a avaliação do grau de enchimento dos contentores, para o traçado de percursos e para o conhecimento estatístico do comportamento dos diferentes pontos de recolha.

Os serviços responsáveis pela gestão de resíduos devem dotar-se de soluções que lhes permitam efectuar a gestão operacional da recolha de resíduos, tendo como objectivo a redução de custos operacionais.

O mercado oferece aplicações que permitem a caracterizar a operação de recolha de resíduos a partir do levantamento de elementos relativos a: nome das ruas e localização dos contentores a recolher; horas de partida da garagem; de chegada ao primeiro ponto de recolha e de chegada e partida do local de descarga da viatura; quantidades recolhidas; distâncias percorridas.

Com recurso a ferramentas informáticas, muitos destes e de outros dados, essenciais para uma boa gestão dos circuitos, podem ser recolhidos numa base diária.

O Sistema de Posicionamento Global (do inglês *Global Positioning System*, GPS) permite a localização geográfica de pontos de interesse a partir de um sistema de navegação baseado em satélites artificiais que emitem sinais rádio com informação sobre uma posição tridimensional, velocidade e tempo numa base de 24 horas. Este sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano para ser utilizado com fins civis e militares.

Vulgarmente conhecidos por GPS, os receptores captam os sinais emitidos pelos satélites visíveis. Estes dados são processados pelo GPS que os traduz nas três coordenadas posição (latitude, longitude e altitude), velocidade e tempo.

Existem duas categorias de GPS, os receptores multiplexados e os receptores de canais paralelos. Isto diz respeito à forma como os sinais são recebidos. Um GPS deve bloquear os sinais pelo menos de três satélites de modo a fazer uma triangulação. Um receptor multiplexado apenas estabelece contacto com um ou dois satélites tendo que procurar satélites diferentes para obter a informação necessária. Um receptor de canais paralelos bloqueia e fica com os respectivos satélites até completar a triangulação. Esta característica permite obter a informação o mais fiável e actualizada possível.

Hoje em dia o mercado disponibiliza aparelhos, fixos ou portáteis, que permitem obter rumos verdadeiros, calcular desvios, marcar pontos, traçar rotas ou seja um sem número de opções, e ainda de poderem ser combinados e interligados com outros instrumentos de bordo como sondas, pilotos automáticos, radares, *plotter's*.

O DGPS, um GPS diferencial, recebe informações adicionais de uma estação terrestre próxima e de posição conhecida. Esta estação capta os sinais dos satélites e corrige diversos erros e envia sinais rádio que são interpretados pelo DGPS aumentando assim a precisão posicional. O preço deste aparelho não justifica o seu uso na navegação de recreio.

A conjugação de um computador portátil com GPS e uma aplicação que permita o armazenamento da informação geográfica (SIG móvel, por exemplo) constituem um instrumento de excelência para o levantamento de dados geográficos, designadamente rede viária e localização de pontos de interesse. São exemplos de SIG móveis o *ArcPad* desenvolvido pela *ESRI* e o *GeoRSU* desenvolvido pela *PH Informática*.

2.1.3.3 ESPECIFICIDADES NA DEFINIÇÃO DE CIRCUITOS DE RECOLHA

Uma importante técnica heurística para a análise macro-circuito consiste em dividir a área a intervir em zonas, cujos critérios de delimitação podem ser as barreiras físicas ou administrativas (por exemplo rios, linhas de comboio, auto-estradas, estrada com grande tráfego, grandes parques urbanos). Após a identificação de zonas, estas podem ser divididas em circuitos individuais (Rhyner *et al.*, 1995).

Schur e Shuster (1974) identificaram alguns princípios que podem ser aplicados à análise macro e micro-circuito. Dentro destes princípios destacam-se, entre outros, os seguintes:

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

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

2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

A crescente necessidade da Sociedade para compreender e moldar o seu espaço de vivência induziu ao aparecimento da informação geográfica. O conceito de sistema de informação geográfica foi desenvolvido originalmente nos anos sessenta, como um meio de sobrepor e combinar vários tipos de dados num mesmo mapa.

Burrough (1986) define um SIG como um poderoso conjunto de ferramentas para recolha, armazenamento, reutilização da forma mais conveniente, transformação e visualização de dados espaciais do mundo real.

Para Maguire *et al.*, (1991) um SIG é uma tecnologia de informação que armazena, analisa e mostra dados espaciais e/ou não espaciais. Entendendo-se por tecnologia, o conjunto de métodos e materiais usados para alcançar um objectivo, e por sistema, o conjunto de componentes que integram para alcançar um objectivo comum.

Os sistemas de informação geográfica são sistemas destinados ao tratamento de dados georeferenciados. Permitem a manipulação de dados de diversas fontes, tais como mapas, imagens de satélite, cadastro, entre outras, permitindo armazenar e combinar informação, por forma a efectuar todos os tipos de análise sobre os dados (Gonçalves, 2002).

O potencial operacional dos SIG é actualmente reconhecido e totalmente aceite por Organizações e Governos de países desenvolvidos e subdesenvolvidos. Sabendo que a informação é um recurso indispensável ao sucesso e um pouco por todo o mundo surgem iniciativas e são definidas estratégias de actuação que permitam conjugar atitudes e estratégias, procura-se, para cada área de actuação, contribuir para um conhecimento completo e detalhado da realidade existente.

Os dados são o elemento mais importante na criação de um SIG. Existem dois tipos de dados: dados espaciais e dados alfanuméricos. Os dados espaciais, também designados dados gráficos, correspondem à base cartográfica. Estes podem ser obtidos de várias formas tais como levantamentos fotogramétricos, topográficos, detecção remota, via GPS, entre outros. Os dados alfanuméricos, também designados por não gráficos, caracterizam qualitativa e quantitativamente os elementos representados na base cartográfica. Este tipo de informação é armazenado em bases de dados (Neto, 1998).

Os sistemas de informação geográfica fornecem um suporte georeferenciado para um vasto conjunto de informações sob a forma de bases de dados com especificações diversas e articulações com diferentes aplicações de bases de dados, permitindo uma representação visual eficiente dessa informação, e, principalmente, suportando um amplo conjunto de funcionalidades de acesso, actualização e análise dessa informação.

No entanto, a ausência de especificações para bases de dados de sistemas SIG permite que cada aplicação faça uso de um conjunto de especificações essencialmente voltadas para as necessidades imediatas do utilizador. Esta prática é dispendiosa e não permite uma uniformidade de procedimentos e sinergias entre serviços que necessitam de partilhar informação.

2.2.1 ENQUADRAMENTO LEGAL

A Directiva INSPIRE, Directiva 2007/2/EC do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de Março de 2007, surge com o propósito de normalizar as fontes de informação geográfica.

Aquela Directiva estabelece a criação da Infra-estrutura Europeia de Informação Geográfica, pretendendo promover a disponibilização de informação de natureza espacial, utilizável na formulação, implementação e avaliação das políticas ambientais da União Europeia.

É objectivo da Directiva trazer aos cidadãos europeus a possibilidade de facilmente encontrarem através da *internet* informação útil em termos de Ambiente e outras temáticas, permitindo também que as autoridades públicas beneficiem mais facilmente de informação produzida por outras autoridades públicas.

Este documento incide sobre informação espacial da responsabilidade das instituições públicas dos Estados Membros, referente a um conjunto de temas distribuídos por três anexos que abrangem dados espaciais de natureza trans-sectorial e dados espaciais específicos do sector ambiental.

A Directiva obriga os Estados Membros a gerirem e a disponibilizarem os dados e os serviços de informação geográfica (IG) de acordo com princípios e regras comuns (metadados, interoperabilidade de dados e serviços, utilização de serviços de IG, princípios de acesso e partilha de dados, por exemplo).

De acordo com o estabelecido na Directiva, as instituições portuguesas produtoras de informação geográfica deverão:

- Criar e disponibilizar os metadados:

"Os Estados Membros devem assegurar que sejam criados metadados para os conjuntos e serviços de dados geográficos que correspondam às categorias temáticas enumeradas nos Anexos I, II e III, e que esses metadados sejam mantidos actualizados (artigo 5.º n.º 1)."

- Garantir a interoperabilidade de dados e serviços. Os Estados Membros devem assegurar que:

"... todos os conjuntos de dados geográficos recentemente coligidos e largamente reestruturados, bem como os serviços de dados geográficos correspondentes, estejam disponíveis em conformidade com as regras de Implementação no prazo de 2 anos a contar da aprovação destas...(artigo 7.º n.º 3)."

"... os restantes conjuntos e serviços de dados geográficos ainda em vigor, estejam disponíveis em conformidade com as regras de implementação no prazo de 7 anos a contar da aprovação destas.... (artigo 7.º n.º 3)."

- Disponibilização de serviços de IG:

Os Estados Membros devem estabelecer e explorar uma rede dos serviços (serviços de pesquisa; serviços de visualização; serviços de descarregamento; serviços de transformação; serviços de invocação de serviços) para os conjuntos e serviços de dados geográficos em relação aos quais tenham sido criados metadados nos termos da presente directiva (artigo 11.º n.º 1).

- Estabelecimento de normas de acesso e partilha de dados:

Os Estados Membros devem adoptar medidas com vista à partilha de conjuntos e serviços de dados geográficos entre as autoridades públicas para efeitos dos serviços públicos susceptíveis de terem impacto ambiental (artigo 17.º n.º 1)

Os Estados-Membros devem facultar o acesso aos serviços referidos na Directiva através do geoportal INSPIRE, a partir do qual será possível pesquisar dados, serviços e organizações.

Esta Directiva tem subjacentes alguns princípios estruturantes que importa salientar:

- Os dados devem ser recolhidos uma vez e actualizados no nível em que tal possa ser realizado com maior eficácia;
- A informação geográfica proveniente de diferentes fontes, deverá poder ser combinada de forma transparente, através da Europa, e partilhada por diversos utilizadores e aplicações;
- Deve ser possível a partilha de informação recolhida a um determinado nível com todos os outros níveis, detalhada para análises detalhadas e geral para objectivos estratégicos;
- A informação geográfica de suporte à actividade governamental, a todos os níveis, deverá ser abundante e disponível sob condições que não restrinjam o seu uso generalizado;
- A informação geográfica disponível, tem que ser facilmente identificável, devendo ser fácil analisar a sua adequabilidade para um determinado uso bem como as respectivas condições de acesso e utilização;
- A informação geográfica deverá tornar-se cada vez mais perceptível e fácil de interpretar por se encontrar devidamente documentada e por poder ser visualizada no contexto adequado, seleccionado de forma amigável para o utilizador.

2.3 SIG NA GESTÃO DO AMBIENTE

Desde muito cedo, os SIG têm sido uma componente integrante na gestão ambiental, embora a sua aplicação seja ainda muito incipiente. O SIG faz a ligação dos dados geográficos e seus atributos, tais como os dados territoriais e laboratoriais, os quais permitem a modelação com vista ao planeamento e à realização de objectivos. O objectivo da tecnologia SIG aplicada ao ambiente é, para além da protecção do ambiente, reduzir custos nos negócios e, ao mesmo tempo, possibilitar às organizações que utilizam a tecnologia uma vantagem competitiva num mercado cada vez mais aberto e evoluído.

Os SIG constituem uma ferramenta de importância crucial para as autarquias no desempenho das suas competências ligadas ao ordenamento do território, desenvolvimento do território e gestão de infra-estruturas nele implantadas.

A criação de um SIG municipal, por exemplo, mune as autarquias de um instrumento de extrema utilidade em trabalhos de planeamento e ordenamento do território. Além disso poderá apoiar noutras áreas, designadamente no levantamento cadastral com informação actualizada das parcelas, levantamento e actualização da rede viária, planeamento de transportes e gestão de frotas, serviços de emergência e levantamento de infra-estruturas relativas a abastecimento e saneamento de água, electricidade e gás.

O SIG municipal deve ser o elemento integrador dos vários departamentos que devem utilizar uma base comum de georeferenciação.

A necessidade de criar um SIG que apoiasse a gestão municipal deu origem ao Projecto SIMAT – Sistemas de Informação Municipal: Aplicações Técnicas em Tecnologia SIG. Este Projecto pretendeu, por um lado, estabelecer uma plataforma de aplicações SIG comuns a vários municípios, contribuindo para a consolidação do Projecto de Informatização Municipal da Região Norte, e, por outro, dinamizar uma oferta empresarial consistente nesta área, ultrapassando, desta forma, os próprios limites de intervenção territorial da Região do Norte de Portugal (Monteiro, 2000).

O principal objectivo do Projecto SIMAT foi o desenvolvimento de um conjunto de especificações que permitissem um desenvolvimento coerente de aplicações técnicas SIG para as diversas áreas do Município (Gestão Urbanística, Cadastro, Património, Rede Viária) por forma a que estas fossem simples, muito dirigidas, por forma a que possam ser usadas pelos técnicos, actualmente especialistas nestas áreas, mas sem necessidade de formação complexa na área SIG.

As Autarquias e Associações nacionais constituem os beneficiários do Projecto SIMAT, que potencialmente vão utilizar directamente as aplicações, bem como as Empresas fornecedoras de produtos e serviços em SIG.

Os municípios de Chaves, Guimarães, Maia, São João da Madeira e Associação de Municípios do Vale do Douro Sul foram os promotores do Projecto SIMAT. O desenvolvimento técnico do projecto foi executado pelo INESC Porto – Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, contando com a colaboração da UNAVE – Associação para a Formação Profissional e Investigação da Universidade de Aveiro. A coordenação do projecto foi assegurada pela Parceria – Consultoria de Gestão, Lda. (Monteiro, 2000).

2.3.1 SIG E RECOLHA DE RESÍDUOS

O interesse dos SIG na gestão de resíduos urbanos ainda é incipiente a avaliar pelos normativos específicos que existem sobre a matéria. Contudo, é evidente o potencial que os SIG poderão oferecer na gestão das infra-estruturas de recolha de resíduos. Segundo Matos (2007), a utilização dos SIG é uma mais valia para:

- Distribuição espacial dos contentores;
- Levantamento do cadastro de contentores nomeadamente, localização, natureza, número, capacidade, frequência de recolha e limpeza, idade;
- Avaliação das necessidades espaciais em termos de contentorização tendo em conta as especificações de cadastro habitacional ou densidade demográfica;
- Percepção da dinâmica de enchimento dos contentores e monitorização em tempo real dos níveis de enchimento dos contentores;
- Selecção de percursos de recolha tendo em conta as necessidades de recolha e as especificações da rede viária.

Além disso, os SIG constituem uma interface de suporte para aplicações de cálculo de percursos de recolha de resíduos. De facto, a tecnologia SIG fornece uma boa solução

para o problema da análise de redes com o propósito de cálculo de percursos, porque consegue ter em consideração várias fontes de informação das componentes físicas da rede que estão disponíveis para as aplicações SIG.

O planeamento de circuitos de recolha pode ser optimizado recorrendo a programas de computador, tendo em conta a estrutura viária (largura das ruas, sinuosidade, etc.), o tipo de contentores utilizados e a frequência de recolha, entre outros. O planeamento do serviço de recolha inclui a selecção de equipamento apropriado (viaturas e contentorização), tendo em conta as características da zona e o quantitativo de resíduos em questão.

Muitas são as aplicações informáticas que têm sido desenvolvidas para modelar alguns destes problemas. No entanto, há que ter em conta que são aplicações de apoio à gestão e, como em qualquer ferramenta deste tipo, o utilizador deve conhecer o tipo de dados de entrada a introduzir e que tipo de resultados pretende.

De um modo geral, existe um conjunto de informação que é requerida para a generalidade dos programas comerciais, designadamente (a) delimitação das fronteiras da área de recolha; (b) localização dos pontos de recolha; (c) identificação das ruas que requerem o serviço de recolha; (d) informação sobre as restrições de trânsito; (e) tipo de contentores e respectivas quantidades; (f) tempo médio de recolha por rua (ou entre pontos); (g) localização da garagem e do local de descarregamento da viatura; (h) quantidade de resíduos produzidos por rua (ou por ponto de recolha); (i) frota disponível e respectivas quantidades; (j) dimensão da equipa; (l) frequência da recolha em cada ponto.

3 PROBLEMAS DE PERCURSOS DE VEÍCULOS

No presente capítulo apresenta-se um enquadramento bibliográfico dos problemas de percursos de veículos e respectivas soluções.

Um problema de percurso de veículos compreende a definição de trajectos de veículos que minimizem o custo total de um serviço, cada um dos quais com origem e destino num depósito ou parque de viaturas, assegurando que cada ponto seja visitado uma vez e a carga, em qualquer percurso, não exceda a capacidade máxima do veículo.

Há autores que defendem a classificação dos problemas de percursos de veículos em função de restrições de aspectos espaciais e/ou temporais. Assim, a classificação segundo Bodin *et al.* (1983) assenta na segregação dos problemas de percursos de veículos em três grandes grupos: problemas de percursos puros, problemas de programação de veículos e problemas combinados de percursos e programação de veículos.

Os problemas de percursos puros consideram apenas aspectos espaciais, não há restrições temporais relacionadas com horários, nem relações de precedência entre os intervenientes do problema. O objectivo deste tipo de problemas é construir um conjunto de percursos com o menor custo possível.

Os problemas de programação de veículos consideram aspectos espaciais e temporais. Há restrições temporais como horas de chegada e saída e paragens para reabastecimento, por exemplo.

Os problemas combinados de percursos e programação de veículos consideram restrições de precedência entre tarefas e/ou restrições de janelas temporais. As relações de precedência ocorrem quando a entrega de uma mercadoria deve ser precedida pela sua recolha. As janelas temporais correspondem ao intervalo de tempo em que pode ocorrer a entrega ou recolha.

Por outro lado, há autores que defendem a segregação dos problemas de percursos de veículos em função do ambiente operacional e dos objectivos: problemas relacionados com o transporte de passageiros, problemas de prestação de serviços e problemas de percursos e programação ou transporte de carga (Ronen, 1998).

Os problemas relacionados com o transporte de passageiros incluem os sistemas de transporte urbano, táxis e transportes escolares, por exemplo.

Os problemas de prestação de serviços correspondem ao cálculo de percursos e programação de serviços como a recolha de resíduos, entrega de correio e limpeza urbana.

Problemas de percursos e programação ou transporte de carga apresentam critérios de classificação, tais como tamanho da frota, composição da frota, estrutura de custos da frota, componentes de custo, números de base de origem e destino dos veículos, tipo de operação, natureza das cargas, número de viagens por veículo num determinado período, duração ou tempo máximo permitido de viagem, tipo de entrega, distâncias e tempos, função objectivo do modelo.

Para Assad (1988) a maior dificuldade em encontrar um esquema de classificação apropriado está em considerar ou não as restrições do problema e o método de solução proposto. Para este autor cada problema prático deve ser caracterizado particularmente segundo um conjunto de elementos. Outra classificação baseia-se na disponibilidade das afectações (recolhas ou entregas). Nos problemas clássicos de cálculo de percursos, assume-se que a afectação é previamente conhecida, afectação determinística. No cálculo de percursos dinâmico a afectação é estocástica, ou seja, os percursos ocorrem em tempo real.

A caracterização dos problemas de percursos de veículos proposta por Assad (1988) assenta na classificação dos seguintes elementos:

- Natureza das afectações: somente recolhas ou entregas; um ou múltiplos produtos; atendimento total ou parcial da afectação; prioridade no atendimento aos clientes;
- Características da afectação: determinística ou estocástica, constante ou variável;
- Frota de veículos: homogénea ou heterogénea; restrições de capacidade dos veículos; restrições dos veículos em função do tipo de viatura; frota fixa ou variável; frota num ou múltiplos depósitos;
- Requisitos de pessoal: duração do turno de trabalho; inclusão de horas extraordinárias; número fixo ou variável de motoristas; horários e locais de início de turno; hora do almoço e outras paragens;
- Requisitos de programação: restrições de janelas temporais para recolha ou entrega; tempos de carga e descarga; horários de abertura e de fecho;
- Requisitos de informações: disponibilidade geográfica; tempos de viagem; localização dos veículos.

3.1 GRAFOS E REDES

As soluções de problemas de transporte, designadamente problemas de percursos de veículos, baseiam-se na análise de redes. O uso da análise de redes é requerido para determinar trajectos de menor custo sobre um conjunto de arcos e nós, tendo em consideração determinados constrangimentos. Uma rede é interpretada como um grafo e representa a interacção ou o movimento entre determinadas localizações definidas por pontos.

A teoria de grafos teve origem no famoso problema histórico da matemática as sete pontes de Königsberg. O problema baseou-se na cidade de Königsberg, (Prússia até 1945, actual Kaliningrado, Rússia), dividida pelo Rio Pregolia onde há duas grandes ilhas que, juntas, formam um complexo que na época tinha sete pontes. Discutia-se a possibilidade de atravessar todas as pontes, sem repetir nenhuma. Havia-se tornado uma lenda popular essa possibilidade quando Leonhard Euler, em 1736, provou que não existia caminho que possibilitasse tais restrições.

Euler usou um raciocínio muito simples. Transformou os caminhos em rectas e suas intersecções em pontos criando possivelmente o primeiro grafo da história. Então percebeu que só seria possível atravessar o caminho inteiro passando uma única vez em cada ponte se houvesse no máximo dois pontos de onde saia um número ímpar de caminhos. A razão de tal coisa é: de cada ponto deve haver um número par de caminhos, pois será preciso um caminho para "entrar" e outro para "sair". Os dois pontos com caminhos ímpares referem-se ao início e ao final do percurso, pois estes não precisam de um para entrar e um para sair, respectivamente.

Um grafo é um conjunto de curvas, chamados arcos (arestas, ramos, eixos ou ligações) e um conjunto de pontos, designados por nós (vértices ou junções). Os arcos ligam um certo número de pares de nós. A Figura 3.1 apresenta um grafo constituído por cinco nós, designados de A a E, e seis ramos definidos pelas curvas AB, AC, AD, BC, CD e DE.

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

Dois ramos são conexos se possuírem um nó comum. Na Figura, os ramos AB e AC são conexos, mas os ramos AB e CD são não conexos. Um percurso é uma sequência de ramos conexos, tal que nenhum nó é repetido nessa alternância de nós e ramos. Uma rede é conexa se para todo o par de nós da rede existir, pelo menos, um percurso interligando o par. Se o percurso é único para cada par de nós, a rede conexa é chamada árvore. Equivalentemente, uma árvore é uma rede conexa que tem um nó a mais que os ramos (Bronson; Naadimuthu, 2000).

Exemplificando, {ED, DA, AB} é um percurso, mas a sequência de ramos conexos {CA, DC, CB} não é um percurso, já que o nó C ocorre duas vezes nesta sequência. A rede é conexa e permanece conexa, mesmo que se retirem os ramos DA e AB. Se, contudo, fosse retirado DE, a rede seria não conexa, uma vez que não existiria um percurso unindo D e E. Como D e C são interligados por três percursos, a rede não é uma árvore (Bronson; Naadimuthu, 2000).

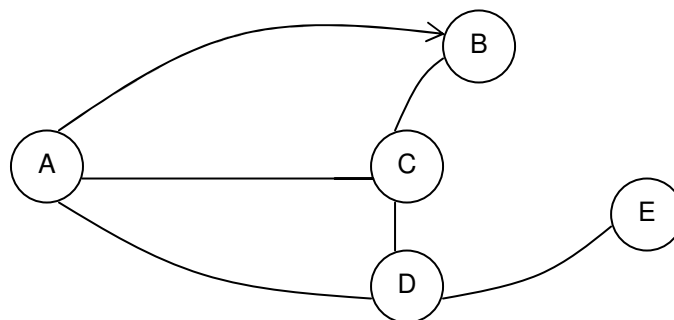


Figura 3.1 – Grafos

Existem vários algoritmos comuns na teoria de grafos, entre eles, o caminho de custo mínimo, o caminho mais curto e o caminho mais rápido. No que diz respeito ao caminho de custo mínimo, este algoritmo baseia-se no peso atribuído a cada arco da rede, obtendo-se o caminho de menor peso. Os arcos que participam no trajecto obtido são os

que possuem o custo mínimo associado. O custo é a característica da ligação da qual vai depender a análise pretendida, podendo ser da ordem do comprimento, do tempo, da velocidade, ou de outros. Na terminologia dos Grafos, diz-se, de uma forma intuitiva, que um caminho é uma sequência de nós distintos conectados numa direcção pelos arcos (Fischer, 2003).

Um problema de percurso mínimo envolve uma rede conexa, com custos não negativos associados a cada um dos ramos. Um nó é designado como origem e um outro como destino (estes termos não implicam uma orientação dos ramos da rede, apenas sugerem o sentido em que será aplicado o algoritmo de resolução). O objectivo é determinar um percurso que ligue a origem ao destino, tal que a soma dos custos associados aos ramos de percurso seja mínima.

3.2 PROBLEMAS CLÁSSICOS DE PERCURSOS

As aplicações informáticas desenvolvidas para apoiar o planeamento e organização de problemas de transporte normalmente baseiam-se em dois problemas clássicos da investigação operacional: o problema do caixeiro-viajante e o problema do carteiro chinês. Em seguida são apresentados os problemas clássicos de percursos de veículos baseados nos trabalhos de Bodin *et al.* (1983) e Solomon e Desrosiers (1988).

3.2.1 PROBLEMA DO CAIXEIRO-VIAJANTE

O problema do caixeiro-viajante (do inglês *Traveling Salesman Problem, TSP*) é um problema de optimização associado à determinação dos percursos denominados hamiltonianos. O seu objectivo é pesquisar o caminho hamiltoniano de menor custo, de forma que todos os vértices sejam percorridos uma única vez.

O problema consiste em determinar um único percurso com o menor custo possível que permita ao veículo percorrer todos os nós (clientes) de uma rede, uma única vez. O *TSP* é baseado num único depósito e o veículo deve sair e retornar à mesma base. Este problema não tem restrições de capacidade de veículos e as afectações (recolhas ou entregas) são previamente conhecidas.

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

3.2.2 PROBLEMA DO CARTEIRO CHINÊS

O problema do carteiro chinês (do inglês *Chinese Postman Problem, CPP*) é uma variação do problema do caixeiro-viajante, porém, ao invés de nós, os clientes estão localizados em arcos. O objectivo do CPP é determinar um único percurso com o menor custo possível que permita ao veículo percorrer todos os arcos (clientes) de uma rede, uma única vez. O problema é baseado num único depósito e o veículo deve sair e

retornar à mesma base. Também este problema não tem restrições de capacidade de veículos e as afectações (recolhas ou entregas) são determinísticas.

Uma extensão do CPP é o problema de percursos de veículos com afectações em arcos (do inglês *Capacitated Arc Routing Problem, CARP*). Adicionalmente ao CPP, o *CARP* inclui a restrição de capacidade dos veículos.

3.2.3 PROBLEMA DE MÚLTIPLOS CAIXEIROS-VIAJANTES

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

3.2.4 PROBLEMA CLÁSSICO DE PERCURSOS DE VEÍCULOS

O objectivo do problema clássico de percursos de veículos (do inglês *Vehicle Routing Problem, VRP*) é encontrar um conjunto de percursos com o menor custo (minimizar custo total de viagem, distância total percorrida), com origem e destino num depósito, de forma que as afectações de todos os nós (recolhas ou entregas), previamente conhecidas, são atendidas.

O *VRP* é uma extensão do problema de múltiplos caixeiros-viajantes, onde se acrescenta a restrição da capacidade de veículos. Algumas formulações também apresentam restrição de tempo máximo de viagem.

Fisher *et al.* (1981) definem os seguintes parâmetros na formulação do *VRP*:

- n – número total de clientes a serem atendidos, que varia entre 1 e n e 0 representa o local de partida e chegada
- NV – número total de veículos disponíveis
- C_v – capacidade máxima do veículo v (peso ou volume)
- d_i – afectação (recolha ou entrega) do cliente i
- c_{ij} – custo de viagem do cliente i ao cliente j ,

O objectivo do *VRP* é minimizar o custo total da viagem.

3.2.5 PROBLEMA DE PERCURSOS DE VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS DEPÓSITOS

O problema de percursos de veículos com múltiplos depósitos (do inglês *Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP*) é uma extensão do *VRP* que utiliza múltiplos depósitos. Os veículos partem e chegam a um depósito, entre os depósitos existentes.

3.2.6 PROBLEMA DE PERCURSOS DE VEÍCULOS COM JANELAS TEMPORAIS

O problema de percursos de veículos com janelas temporais (do inglês *Vehicle Routing (and Scheduling) Problem with Time Windows*, *VRPTW* ou *VRPTW*) é uma extensão do VRP com restrições de tempo. As janelas de tempo aumentam a complexidade do problema, constituindo horários de atendimento (de entrega ou recolha) que os clientes impõem.

Na presença de janelas temporais, o custo total do percurso e programação horária inclui não só os custos de tempo e distância totais de viagem considerados nos problemas de percursos comuns, mas também o custo do tempo de espera incorrido quando um veículo chega muito cedo ao cliente (Solomon, 1987).

O *VRPTW* emergiu como uma extensão importante contribuindo para o sucesso na resolução de problemas de transporte reais complexas. A necessidade de utilização de janelas de tempo surgiu naturalmente em problemas de transporte em organizações que funcionam com horário fixos. Por exemplo, entidades bancárias, entregas postais, recolha de resíduos em indústrias, empresas de transporte.

Até há bem pouco tempo, a complexidade que as janelas de tempo introduzem a este tipo de problemas tem feito com que esta restrição seja manipulada, principalmente por ajuste manual dos percursos com base no horário previamente conhecido.

Enquanto o problema espacial *VRP* tem sido alvo de intensos estudos e investigações nas últimas décadas, pouca atenção tem sido dedicada ao *VRPTW*, que inclui aspectos temporais e espaciais. Tal explica que quase todas as abordagens ao *VRP* fiquem limitadas pelo facto de não serem consideradas janelas de tempo como restrição (Solomon, 1987).

3.3 SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS CLÁSSICOS DE PERCURSOS DE VEÍCULOS

A investigação operacional ou pesquisa operacional é um ramo interdisciplinar da matemática aplicada que faz uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos na ajuda à tomada de decisões. É usada sobretudo para analisar sistemas complexos do mundo real, tipicamente com o objectivo de melhorar ou otimizar a performance.

Face ao seu carácter multidisciplinar, a investigação operacional é uma disciplina científica de características horizontais, estendendo-se os seus contributos por praticamente todos os domínios da actividade humana, desde a engenharia à medicina, passando pela economia e a gestão.

O ramo da investigação operacional que estuda problemas de optimização em conjuntos finitos é a optimização combinatória.

Num problema de optimização existe uma função objectivo e um conjunto de restrições, ambos relacionados com as variáveis de decisão. Os valores possíveis às variáveis de decisão são delimitados pelas restrições impostas sobre essas variáveis, formando um conjunto discreto (finito ou não) de soluções exequíveis a um problema. O problema pode ser de minimização ou de maximização da função objectivo. A resposta para o problema

de optimização, ou seja, o óptimo global, será o menor (ou maior) valor possível para a função objectivo para o qual o valor atribuído às variáveis não viole nenhuma restrição. Em alguns casos, chegamos a valores cuja alteração discreta não conduz a resultados melhores, mas que não são também o óptimo global – a essas soluções chamamos de óptimo local.

A complexidade dos problemas de percursos de veículos depende do número de variáveis e restrições que considera e, mesmo com a evolução computacional, ainda há muitas dificuldades na sua resolução, que residem fundamentalmente na natureza combinatória deste tipo de problemas, o que até hoje tem impedido a concepção de algoritmos eficientes de solução.

Segundo Bodin *et al.* (1983) a complexidade computacional define-se como o comportamento de algoritmos na resolução de um dado problema e baseia-se no número de operações necessárias para o resolver. Quando, para um problema, existe um algoritmo polinomial para sua solução, o problema é chamado de classe P ou “tratável”. Por outro lado, muitos problemas só podem ser resolvidos em tempos exponenciais e são ditos como NP-completos ou “intratáveis”.

Devido ao seu carácter fortemente combinatório, a maioria dos problemas práticos de determinação de percursos de veículos é do tipo NP-completos, isto é, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema, dado pelo número de pontos a serem atendidos (Goldberg; Luna, 2000). Para esses problemas complexos, o procedimento de optimização utiliza técnicas que permitam obter soluções próximas do óptimo, como as heurísticas.

Lenstra e Rinnooy Kan (1981) analisaram a complexidade de problemas de percursos de veículos e concluíram que praticamente todos os problemas de percursos de veículos, inclusive o problema do caixeiro-viajante e o *VRP* e extensões, pertencem à categoria dos NP-completos.

As soluções para problemas de optimização classificam-se em três grandes grupos:

- Métodos exactos;
- Métodos heurísticos;
- Métodos metaheurísticos.

3.3.1 MÉTODOS EXACTOS

O algoritmo clássico de *Dijkstra* constitui um método exacto de solução do problema do caminho mais curto num grafo não direccionado de peso não negativo.

O algoritmo de *Dijkstra* é o mais famoso e mais simples dos algoritmos para cálculo de caminho de custo mínimo entre vértices de um grafo e, na prática, o mais empregado. Escolhido um vértice como origem da pesquisa, este algoritmo calcula o custo mínimo deste vértice para todos os demais vértices do grafo.

O algoritmo pode ser usado sobre grafos orientados (dígrafos), ou não, e admite que todas as arestas possuem pesos não negativos (nulo é possível). Esta restrição é possível no contexto de redes de transportes, onde as arestas representam normalmente distâncias ou tempos médios de percurso; poderão existir, no entanto, aplicações onde as arestas apresentam pesos negativos, nestes casos o algoritmo não funcionará correctamente.

O algoritmo de *Dijkstra* reduz o tempo de processamento e as capacidades necessárias a nível computacional para o cálculo do caminho óptimo. O algoritmo estabelece um equilíbrio através do cálculo de um trajecto que é muito próximo do caminho óptimo, computacionalmente possível de ser calculado, partindo a rede em nós (onde as linhas se ligam) e os trajectos entre esses nós são representados pelos arcos. Adicionalmente, cada linha tem um custo associado representado pelo seu comprimento até alcançar o nó seguinte. Em cada uma das iterações, cada nó candidato é comparado com os outros em termos de custos.

A Figura 3.2 apresenta a aplicação do algoritmo de *Dijkstra* num grafo de seis nós ligados por linhas directas com custos atribuídos, explicando os passos entre cada iteração do algoritmo.

O caminho mais curto entre o nó número 1 e os outros nós pode ser encontrado através dos antecessores desses nós (setas a negrito), enquanto o custo do caminho é anotado junto de cada nó. Todos os nós são processados apenas uma vez de acordo com uma ordem. O nó número 1, considerado a origem, é processado em primeiro lugar. É guardado um registo dos nós que já foram processados, denominado *Queue* (fila sequencial) (Karadimas, 2007).

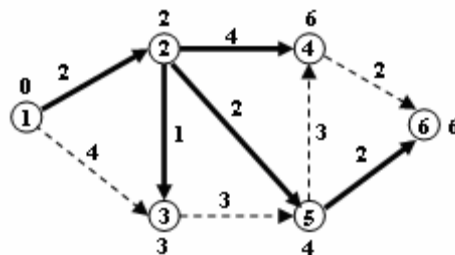


Figura 3.2 – Exemplo da aplicação do algoritmo de *Dijkstra* (Karadimas, 2007)

Processado determinado nó, o procedimento seguinte é perceber se o custo do trajecto desde o nó origem ao nó processado pode ser melhorado incluindo outro nó no trajecto, resultando numa actualização da distância com o novo custo e o conjunto dos antecessores em relação ao nó processado, onde a distância é o custo do caminho desde a origem até esse nó. O nó que será processado a seguir é o que estiver à distância mínima ou custo mínimo, ou seja, é aquele que está mais próximo do nó origem entre todos os nós que ainda têm de ser processados – Quadro 3.1. O caminho mais curto é então definido pelo conjunto dos antecessores (Karadimas, 2007).

Quadro 3.1 – Resultado da aplicação do algoritmo de Dijkstra (Karadimas, 2007)

Queue	Next Node	Distance						Predecessores				
		1	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
1	2	–	2	4	∞	∞	∞					
1, 2	3	–	–	3	6	4	∞		2	2	2	
1, 2, 3	5	–	–	–	6	4	∞					
1, 2, 3, 5	4	–	–	–	6	–	6					5
1, 2, 3, 5, 4	6	–	–	–	–	–	6					
1, 2, 3, 5, 4, 6		–	–	–	–	–	–					

3.3.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

O problema de programação e definição de percursos de recolha de resíduos cai na classe de problemas de percursos de veículos capacitados, isto é, os trajectos são restringidos pela capacidade do veículo, horas de trabalho, hora de abertura e fecho do local de descarga, bem como outros factores.

Embora os algoritmos exactos resolvam com sucesso problemas de percursos de veículos com capacidade restrita, a sua aplicação em problemas práticos de complexidade elevada é limitada, uma vez que requerem demasiado tempo de computação. Consequentemente, um conjunto de algoritmos não exactos, métodos heurísticos, tem sido proposto na literatura (McLeod e Cherrett, 2008).

Os métodos heurísticos não garantem a solução óptima, mas geralmente resultam em soluções sub-óptimas de grande qualidade com um esforço computacional aceitável.

Define-se método heurístico como um procedimento de aproximação das soluções dos problemas, que não segue um percurso claro mas se baseia na intuição e nas circunstâncias a fim de gerar conhecimento novo.

A heurística de uma teoria deveria indicar particularmente os caminhos e possibilidades a serem aprofundadas na tentativa de torná-la uma teoria progressiva, isto é, capaz de garantir um desenvolvimento empírico, prevendo factos novos não percebidos no momento da elaboração do núcleo dessa teoria.

Reeves (1993) define heurísticas como uma técnica que pesquisa boas soluções (perto do óptimo) com um custo operacional razoável, sem garantir soluções exequíveis ou óptimas e, em muitos casos, não é capaz de afirmar quão próximo uma solução praticável está da solução óptima. Além da teoria da complexidade computacional representar uma forte justificativa para a utilização de métodos heurísticos na solução *VRP*, outro forte argumento apresentado pelo autor corresponde à possibilidade de modelar o problema real com maior precisão, uma vez que as heurísticas são mais flexíveis e aptas a operar com funções objectivos e/ou restrições mais complicadas e mais realistas do que os algoritmos exactos.

A heurística de economias de Clarke e Wright (1964) tem sido muito utilizada e com sucesso em problemas clássicos de percursos de veículos, *VRP*. O método permite incluir vários tipos de restrição, tais como restrições de janelas de tempo.

O método das economias determina percursos que respeitam restrições de tempo (duração máxima da jornada de trabalho) e de capacidade, com o objectivo de minimizar a distância total percorrida pela frota. As restrições básicas do problema são (Clarke e Wright, 1964):

- Cada percurso tem origem e destino no mesmo depósito;
- Cada cliente pertence somente a um único percurso;
- A afectação de cada cliente não pode exceder a capacidade do veículo;
- A afectação de todos os clientes de um percurso não pode exceder a capacidade do veículo;
- O tempo total de um percurso não pode exceder a duração máxima da jornada de trabalho do motorista.

3.3.3 MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

Os métodos metaheurísticos, por muitos autores classificados por heurísticos, são também designados por métodos emergentes e caracterizam-se por utilizarem dois ou mais procedimentos, com o objectivo de modificar e aprimorar gradualmente a solução (Cunha, 1997).

A pesquisa tabu é um método de optimização matemática metaheurístico, da classe dos métodos de pesquisa local. A partir de uma solução possível, este método tenta avançar para uma outra solução (melhor que a anterior) na sua vizinhança até que se satisfaça um determinado critério.

O nome deste método vem das listas tabu, que compreendem listas com soluções não permitidas. Na sua forma mais básica, contêm os n últimos elementos visitados. Outras listas podem conter soluções proibidas devido a, por exemplo, certos atributos da solução ou movimentos ilegais no contexto do problema.

3.3.3.1 SOLUÇÃO DO *VRP*

Taillard (1993) desenvolveu a pesquisa tabu como um método iterativo para um problema de percursos de veículos, *VRP*. O problema tem como características uma frota de veículos homogénea e o objectivo é determinar os percursos para cada veículo de forma a que a distância total percorrida pelos veículos seja minimizada, a afectação por ponto a percorrer (recolha ou entrega) seja atendida e as restrições de capacidade dos veículos e duração máxima do turno de trabalho sejam respeitadas.

Também Barbarosoglu e Ozgur (1999) desenvolveram uma metaheurística pesquisa tabu para um problema de percursos de veículos (*VRP*) com base no algoritmo desenvolvido por Taillard (1993). A frota de veículos é homogénea e há restrições de capacidade dos veículos e duração máxima da jornada de trabalho. Os autores sugerem um novo procedimento de pesquisa de vizinhança sem qualquer diversificação e um novo esquema de intensificação.

Na metaheurística pesquisa tabu desenvolvida por Kelly e Xu (1999) para um problema de percursos de veículos (*VRP*) o objectivo é minimizar a distância total percorrida, garantindo o atendimento de todos os clientes respeitando a restrição de capacidade dos veículos. O algoritmo segue duas etapas: a primeira utiliza uma heurística construtiva de forma a calcular percursos diversos; a segunda é implementada uma heurística de melhoria baseada no fraccionamento de conjuntos e a metaheurística pesquisa tabu, que combina os percursos obtidos com técnicas de pesquisa local baseadas em Taillard (1993).

Os resultados numéricos das metaheurísticas desenvolvidas quer por Barbarosoglu e Ozgur (1999), quer por Kelly e Xu (1999), mostraram que o desempenho dos algoritmos é semelhante aos melhores resultados encontrados na literatura.

3.3.3.2 SOLUÇÃO DO *VRPTW*

Os autores Garcia, Potvin e Rousseau (1994) desenvolveram uma metaheurística pesquisa tabu para um problema de percursos de veículos com janelas temporais (*VRPTW*), cujo objectivo consistiu no atendimento dos clientes com o menor custo possível, respeitando as restrições de capacidade dos veículos e janelas de tempo. Para além da distância total percorrida (tempo total da viagem), o custo dos percursos inclui também o tempo total de espera.

Também Potvin *et al.* (1996) propuseram uma metaheurística pesquisa tabu para um problema de percursos de veículos com janelas temporais (*VRPTW*). Considerando um depósito central, uma frota de veículos homogénea e um conjunto de clientes com afectações conhecidas, o objectivo é minimizar um conjunto de percursos, com saída e chegada ao depósito, que atenda todos os clientes ao menor custo possível. O objectivo da metaheurística é, em primeiro, minimizar o número de veículos necessários e, em segundo, a distância total percorrida (ou tempo de viagem), além do tempo de espera, respeitando as restrições de capacidade dos veículos e janelas de tempo.

3.4 SOLUÇÕES E APLICAÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO

São exemplos de aplicações que usam soluções de percursos de veículos o *Google Earth*, *Via Michelin*, *Google Maps* e *Microsoft AutoRoute*.

Em seguida apresentam-se outras soluções para problemas de percursos de veículos disponíveis no mercado além do *Network Analyst*, objecto de estudo do presente trabalho.

3.4.1 *TRANSCAD DA CALIPER CORPORATION*

O *TransCAD*, desenvolvido pela Caliper Corporation, combina um SIG e um sistema de modelação de capacidades de transporte numa plataforma integrada (SIG-T). É um sistema utilizado para armazenar, visualizar, gerir e analisar dados de transporte.

Quando aplicado a problemas de transporte e logística, este sistema pode ser utilizado em diferentes sectores (públicos ou privados) em aplicações tais como: operações de recolha e entrega; planeamento da distribuição; recolha e entrega porta-a-porta; limpeza de ruas ou remoção de neve; recolha indiferenciada e selectiva de resíduos; e cálculo de distâncias percorridas.

3.4.2 *ARCLOGISTICS ROUTE DA ESRI*

O *ArcLogistics Route*, desenvolvido pela ESRI, permite calcular percursos de veículos, além de construir sequências de visita considerando factores como tempo, custo, capacidade e produtividade de veículos.

Esta ferramenta pode ser utilizada em várias aplicações, a saber: operações governamentais, permitindo a redução de custos e melhoria de serviços, adequando-se ao mesmo tempo a questões políticas e regulamentares; gestão de frotas de veículos, constituindo uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, tanto no que diz respeito ao cálculo, quanto ao planeamento de percursos de entrega (comercial e residencial); operações relacionadas à saúde pública, possibilitando maior eficiência tanto em serviços de transporte de pacientes (emergência/transferência), feitos por ambulâncias, como em recolhas de material destinado a exames laboratoriais; telecomunicações, auxiliando companhias públicas ou privadas na redução de custos, ao mesmo tempo, mantendo/aumentando níveis de infra-estrutura, manutenção e serviços.

3.4.3 *GEOMEDIA TRANSPORTATION MANAGER DA INTERGRAPH*

O *GeoMedia Transportation Manager*, desenvolvido pela Intergraph, constitui uma ferramenta de criação, calibração, edição e manutenção de redes. O *Transportation* permite a análise de sistemas de referência linear, designadamente análise espacial e análise de percursos (*routing*), sendo aplicado na optimização de percursos e cálculo de isócronas (linhas que unem os pontos correspondentes a iguais tempos de viagem).

3.4.4 *ROUTESMART DA ROUTESMART TECHNOLOGIES INC.*

O *RouteSmart* disponibilizado pela *Routesmart Technologies Inc.* permite calcular percursos de veículos. O mercado alvo deste *software* são empresas que trabalham com transportes, designadamente empresas de distribuição de jornais, serviços de recolha de resíduos, serviços de entrega de correspondência. Na execução de percursos o *software* tem em conta as restrições de trânsito obtendo-se percursos equilibrados em termos de tempo e volume.

3.4.5 *FLEETROUTE DA CIVIX L.L.C.*

O *FleetRoute*, desenvolvido pela *CIVIX L.L.C.*, é um *software* de modelação baseado num SIG, para optimização de percursos de veículos, conduzindo à minimização dos recursos envolvidos num serviço de transporte ou distribuição. O *FleetRoute* é uma aplicação compatível com o *ArcView*.

3.4.6 *GISMAT RSU DA PH INFORMÁTICA*

Desenvolvida com o objectivo de minimizar os problemas associados à recolha de resíduos, a solução *GISMAT RSU* permite o registo exaustivo de todos os equipamentos e a sua localização espacial rigorosa, nomeadamente papeleiras, contentores, ecopontos, ecocentros, entre outros, para que facilmente se possam definir e optimizar percursos de recolha indiferenciada e selectiva dos resíduos sólidos urbanos, em função da quantidade produzida, dias da semana e caracterização dos recursos existentes para a recolha, bem como a análise espacial dos dados.

3.4.7 *AUTOCAD E SIG*

O *AutoCAD Map 3D* é um *software* de cartografia e SIG desenvolvido pela Autodesk para a criação e gestão de dados espaciais. A partir da ligação entre o CAD e o SIG, o *AutoCAD Map 3D* permite que engenheiros, planeadores, técnicos de cartografia, topógrafos e colaboradores de SIG consultem, editem, visualizem e analisem uma grande variedade de dados espaciais e de CAD. Entre as funcionalidades do *software* incluem-se: definição de sistemas de coordenadas geográficas, acesso directo a dados, intercâmbio de dados, consulta (*query*) de ficheiros de desenho (.dwg), edição de CAD sobre dados geoespaciais, funcionalidades para levantamentos topográficos, criação e estilização de mapas, ferramentas de análise e integração de bases de dados entre outras.

4 APLICAÇÕES DE ANÁLISE DE REDES

Comercializado pela ESRI, o *ArcGIS Desktop* (última versão 9.3.1), vulgarmente designado por *ArcGIS*, inclui duas aplicações integradas que constituem um SIG: o *ArcCatalog* e *ArcMap*. Em qualquer uma das aplicações referidas pode aceder-se ao *ArcToolbox* e a interfaces de geoprocessamento.

O *ArcCatalog* (Figura 4.1) permite aceder, organizar e gerir os dados geográficos. Inclui ferramentas para explorar e pesquisar informação geográfica, gravar e visualizar metadados, visualizar rapidamente qualquer conjunto de dados (ESRI, 2007).

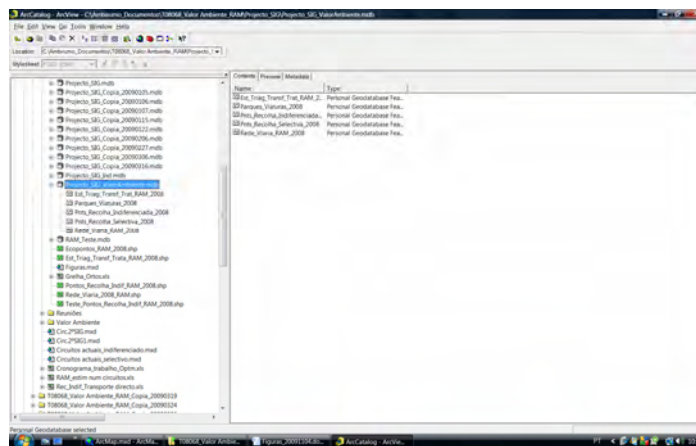


Figura 4.1 – Ambiente *ArcCatalog*

O *ArcMap* (Figura 4.2) é a aplicação principal do *ArcGIS* para a apresentação, inquirição, edição, criação e análise de dados. É a componente que fornece ferramentas para a criação de apresentações visuais dos dados, inquirição e criação de mapas com qualidade profissional. Adicionalmente, inclui funções de análise, produção de gráficos e relatórios e um conjunto de ferramentas de edição para criação e edição dos dados geográficos (ESRI, 2007).

O *ArcToolbox* (Figura 4.2) contém as ferramentas para conversão de dados, gestão de sistemas de coordenadas, alterações de projecções e análise espacial (ESRI, 2007).

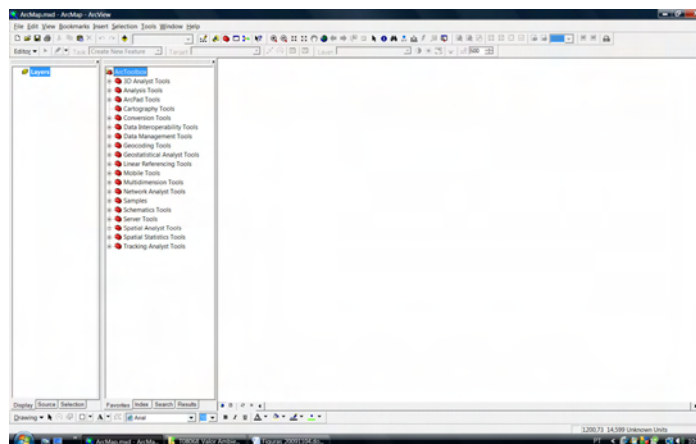


Figura 4.2 – Ambiente *ArcMap* e *ArcToolbox*

O *ArcGIS* tem disponíveis três versões de *software*, cada uma disponibilizando um nível mais elevado de funcionalidade: *Arcview*, *ArcEditor* e *ArcInfo*. O *ArcView* fornece ferramentas avançadas de produção de mapas e de análise geográfica, em conjunto com ferramentas básicas de edição e geoprocessamento. O *ArcEditor* inclui as funcionalidades do *ArcView* e, adicionalmente, integra capacidades de edição avançadas. O *ArcInfo* alarga o leque de funções ao incluir o geoprocessamento avançado.

O *Network Analyst* é a extensão do *ArcGIS* desenvolvida para criar, gerir e analisar redes de transportes. Esta extensão incorpora um modelo avançado de conectividade que representa com grande exactidão redes de transportes multi-modais, permitindo simular percursos inteligentes em cenários tão complexos como redes de transportes, onde se cruzam num mesmo ponto estações de comboios e autocarros.

O *ArcGIS Network Analyst* permite delinear percursos otimizados com base no tempo ou no espaço percorrido, indicar direcções de percursos, fazer um levantamento das entidades e serviços mais próximos e definir áreas de serviço.

A aplicação foi desenvolvida para fins comerciais com o objectivo de solucionar diferentes tipos de problemas relativos a redes de transporte. Encontrar o melhor percurso entre dois locais, encontrar a instalação mais próxima de uma dada localização e definir áreas de influência baseadas em tempos de viagem, são exemplos de problemas a solucionar pelo *Network Analyst*. Permite ainda o cálculo de matrizes de origem-destino para várias localizações na rede, bem como atribuir percursos e paragens a frotas de veículos.

Desenvolvido para solucionar problemas de diferente complexidade, o *Network Analyst* encerra dois métodos de cálculo de percursos: um método exacto, baseado no algoritmo de *Dijkstra* e um método metaheurístico, que resulta de uma extensão do VRP (do inglês *Vehicle Routing Problem*).

Os algoritmos mencionados são algoritmos fechados, isto é, são propriedade privada da entidade que os desenvolveu, a ESRI, inacessíveis ao utilizador comum. O que se conhece destes algoritmos é a informação constante nos manuais de informação disponibilizados pela entidade que os desenvolveu e comercializa.

Em seguida são apresentadas as principais características e propriedades do *ArcGIS Network Analyst*.

4.1 ORGANIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO EM AMBIENTE *ARCGIS*

O *ArcView*, SIG de suporte do *Network Analyst*, permite a edição de dados geográficos (coordenadas) e tabulares (atributos). As componentes genéricas da informação geográfica são:

- Geometria: representa os elementos geográficos associados a locais da realidade física;
- Atributos: fornecem as características descritivas dos elementos geográficos;

A cada elemento geográfico introduzido corresponde um registo na tabela de atributos. Cada atributo define uma dada especificação.

A realidade física do espaço geográfico pode ser representada recorrendo a informação cartográfica, designadamente entidades geométricas do tipo ponto, linha ou polígono. Contudo, não é funcional armazenar toda a realidade física que pode ser representada por linhas num único conjunto de linhas. As *features classes* (classes de elementos) permitem agregar elementos semelhantes numa única unidade. Uma *feature class* diz respeito ao conjunto de dados do mesmo tipo, por exemplo pontos, linhas ou áreas.

Ao conjunto de *feature classes* que partilham o mesmo sistema de coordenadas designa-se *feature dataset*.

Em ambiente SIG a informação encontra-se agrupada em camadas, designadas por *layers*.

As *layers* não armazenam os dados geográficos, elas guardam os endereços para uma origem de dados assim como as propriedades de visualização para essa fonte de dados. As *layers* são armazenadas como parte de um documento mapa gravado (ficheiro .mxd), mas elas próprias também podem ser guardadas como ficheiros independentes. Os ficheiros *layer* (ficheiros .lyr) são um método eficaz de predefinir simbologia e outras propriedades que lhe permitem partilhar opções standard de visualização para fontes de dados específicas (ESRI, 2007).

4.2 REDE VIÁRIA (*NETWORK DATASET*)

4.2.1 ELEMENTOS E ATRIBUTOS DA REDE VIÁRIA

Como já foi referido no ponto 3.1 do presente documento, uma rede é um conjunto de linhas, chamados arcos (ou arestas, ramos, eixos ou ligações) e um conjunto de pontos, designados por nós, em que há intersecção de linhas (ou vértices, junções). No caso da rede viária por exemplo, os arruamentos correspondem aos arcos e os cruzamentos ou entroncamentos correspondem aos nós da rede.

A rede viária constitui a estrutura principal de dados para aplicação de um *software* de análise de redes, constituindo uma precedência à utilização de qualquer funcionalidade do *software*.

Sendo a rede viária a estrutura de dados geográficos base, há ainda a necessidade de caracterizar cada elemento da rede, isto é, associar um conjunto de atributos de modo a caracterizar a estrutura da rede. São exemplos de atributos da rede viária: os sentidos da rede, largura da via, proibições e hierarquia da rede.

O comprimento dos troços que constituem a rede viária é outro atributo da rede. Depois de digitalizado o troço, o atributo relativo ao comprimento é definido automaticamente.

Outro atributo a definir na rede é a velocidade. Dependendo das características da rede (sentidos, largura, proibições e hierarquia da rede) o utilizador define a velocidade de circulação na rede.

A variável que representa a resistência que a rede viária oferece à passagem dos veículos é designada como impedância, por exemplo, tempo ou distância.

Em suma, na base de dados da rede viária, para cada segmento da linha, que constitui a rede, deve constar o comprimento e velocidade do troço, que permite determinar o tempo que demora a ser percorrido.

4.2.2 VALIDAÇÃO DA REDE VIÁRIA

A base de dados que constitui a rede viária é digitalizada ou editada em ambiente SIG mas encontra-se sem conectividade, isto é, não existe relação espacial entre os elementos para além da sua localização, entre outras características.

As relações espaciais entre elementos de uma rede são frequentemente referidas como relações topológicas.

A topologia é o ramo da geometria que define as relações espaciais aplicáveis à informação geográfica de modo a estabelecer a conectividade e a ligação entre os elementos espaciais; estabelece a ligação espacial entre os elementos através do reconhecimento de nós no fim de cada linha digitalizada.

A topologia é um conjunto de regras e relações que, associadas a ferramentas e técnicas de edição permitem a modelação, de um modo mais preciso, das relações geométricas existentes entre as entidades geográficas.

A aplicação de regras topológicas à informação geográfica implica que os elementos do tipo ponto, linha e polígono tenham relações do tipo: o que está ligado, o que é adjacente, o que está sobreposto, o que está contido, etc.

A construção de regras topológicas é geralmente uma operação simples, usualmente efectuada após a digitalização da informação.

A correcção topológica da rede viária é efectuada nas componentes mais avançadas do *ArcGIS*, que possuem capacidades de edição avançadas – o *ArcEditor* e o *ArcInfo*.

4.2.3 OUTRAS ESPECIFICAÇÕES EXIGIDAS PELO NETWORK ANALYST

Criada a base de dados é necessário construir a estrutura de rede a aplicar no *Network Analyst* – a *Network Dataset*. As *Network Datasets*, criadas a partir do *ArcCatalog*, são redes compostas por elementos simples (linhas, junções e viragens) relacionadas espacialmente.

Há alguns aspectos a ter em atenção na criação da *Network Dataset*, designadamente os que representam cruzamentos e as passagens superiores e inferiores entre estradas. Como se modelam cruzamentos e viadutos por exemplo? Esta é uma questão essencial na construção de uma rede.

Numa *Network Dataset* construída com base na rede viária, a conectividade, garantida pela coincidência geométrica, é definida entre *features* do tipo linha.

A conectividade dos troços que constituem a *Network Dataset* só existe nos pontos coincidentes de acordo com os exemplos descritos na Figura 4.3.

Numa *feature class* do tipo linha a conectividade pode ser definida nas extremidades das linhas ou em qualquer vértice que constitui a linha (desde que haja coincidência).

Quando a conectividade é definida nas extremidades, uma linha só pode ligar a outra linha pelas extremidades. O cruzamento de duas linhas não representa conectividade – Figura 4.4 (ESRI, 2007). Esta propriedade é definida apenas nas extremidades.

Quando a conectividade é definida por qualquer vértice, duas linhas podem ligar-se em qualquer vértice desde que haja coincidência espacial (um nó/junção). Num cruzamento é necessário um nó nos pontos de coincidência entre os vértices – Figura 4.5 (ESRI, 2007).

A Figura 4.6 apresenta os erros mais comuns cometidos na conectividade das redes, cometidos devido à falta de vértices coincidentes (ESRI, 2007).

Na criação da *Network Dataset* é possível recorrer a atributos de elevação que permitem a representação de cruzamentos da rede viária a diferentes níveis, por exemplo, viadutos, pontes e túneis.

A política de conectividade definida por atributos de elevação é aplicada apenas em conjunto com a conectividade definida por extremidades e em linhas com extremidades coincidentes.

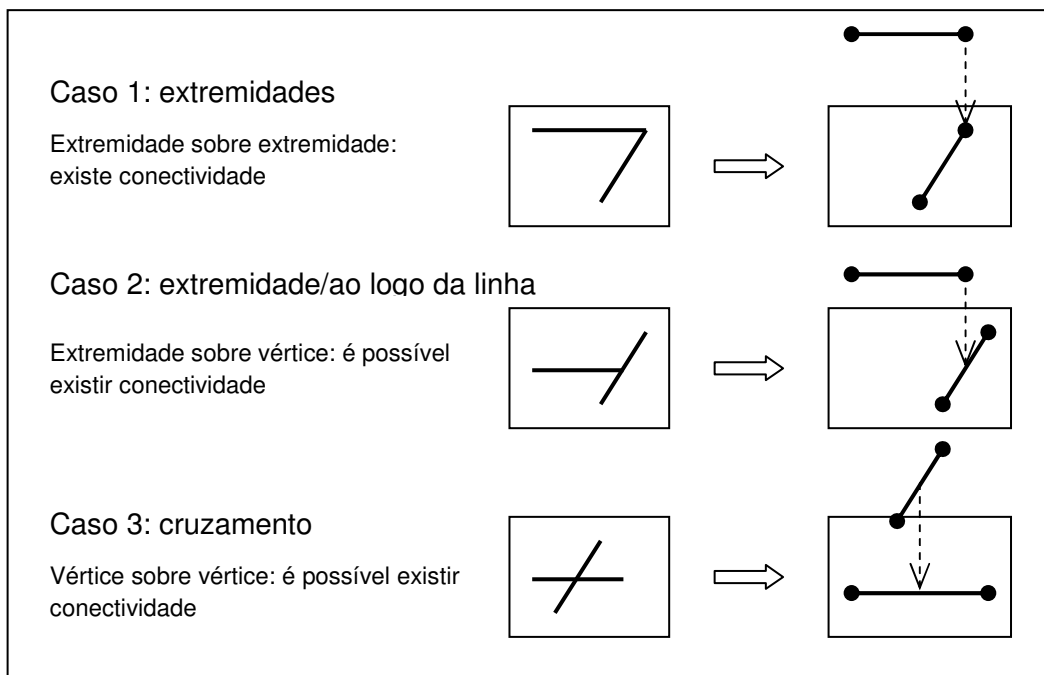


Figura 4.3– Conectividade da rede viária

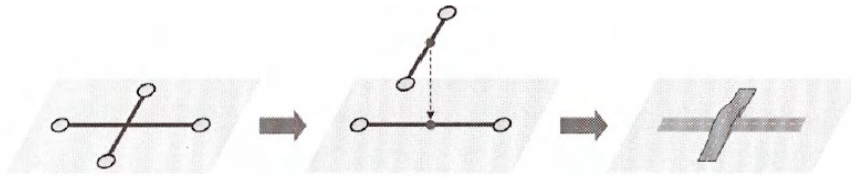


Figura 4.4 – Conectividade apenas nas extremidades das linhas: não há cruzamento de nível

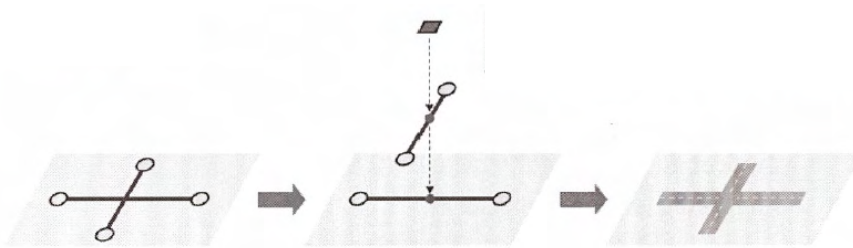


Figura 4.5 – Conectividade em qualquer vértice das linhas: há cruzamento de nível

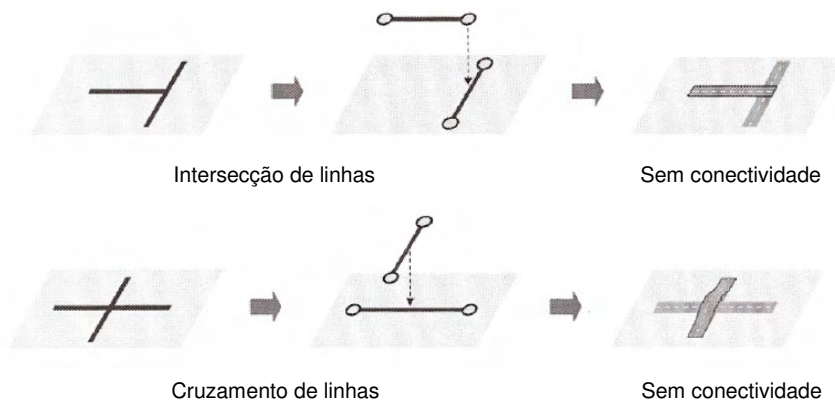


Figura 4.6 – Erros comuns no estabelecimento da conectividade das redes

A Figura 4.7 apresenta um cruzamento com quatro linhas com extremidades coincidentes para um cenário de intersecção ao mesmo nível, definido com atributo zero (ESRI, 2007).

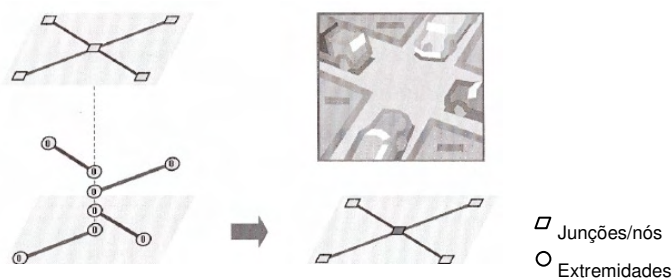


Figura 4.7 – Atributos de elevação: intersecção ao mesmo nível

A Figura 4.8 apresenta um cruzamento com quatro linhas com extremidades coincidentes para um cenário de intersecção a dois níveis, sendo o nível superior (ponte), sem conectividade com o nível inferior, classificado com atributo um (ESRI, 2007).

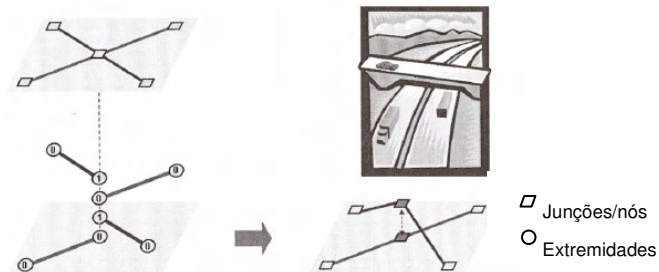


Figura 4.8 – Atributos de elevação: intersecção a diferentes níveis

4.3 LOCALIZAÇÕES NA REDE (*NETWORK LOCATIONS*)

As localizações da rede, no *Network Analyst* designadas por *Network Locations*, são objectos específicos de análise da rede. Estes objectos estão ligados à rede e são usados como dados de entrada.

As *Network Locations* incluem paragens, barreiras, instalações, incidentes, origens, destinos, pontos de recolha e depósitos. Ao contrário de outros objectos de análise da rede, uma *Network Location* é um ponto posicionado junto ou sobre a rede, localizado geograficamente, possuindo quatro atributos obrigatórios: *SourceID*, *SourceOID*, *PosAlong* e *SideOfEdge*, que correspondem a um local na *Network Dataset*. Quando a *Network Location* é adicionada, o *Network Analyst* automaticamente assume aqueles atributos.

Uma *Network Location* só representa uma localização válida na rede se a sua geometria estiver dentro da tolerância de pesquisa das linhas que constituem a *Network Dataset*. Por defeito a tolerância definida no *software* é cinco mil metros, no entanto, esta tolerância pode ser alterada.

O *Network Analyst* oferece três métodos para introduzir as *Network Locations*:

- Criar as localizações interactivamente (através da ferramenta *Create Network Locations*);
- Carregar as localizações a partir de bases de dados existentes (*Feature Class*);
- Carregar as localizações a partir de endereços conhecidos (*Geocode*);

Adicionalmente, há ainda a necessidade de caracterizar cada localização na rede associando-lhe um conjunto de atributos. Os atributos a definir nas *Network Locations* dizem respeito à aproximação da viatura ao local e às características de acessibilidade temporal. Estas propriedades variam de acordo com o tipo de *Network Location*.

Direccionando o contexto para a recolha de resíduos, são exemplos de atributos das localizações na rede: o número de contentores por ponto de recolha e respectiva capacidade e os quantitativos de resíduos a alocar.

A aproximação da viatura à *Network Location* especifica o lado do veículo que fará a aproximação ao ponto. O *software* permite três hipóteses (ESRI, 2007):

- Lado direito do veículo – a localização na rede irá aparecer à direita quando o veículo se aproximar, Figura 4.9 caso 1;
- Lado esquerdo do veículo – a localização na rede irá aparecer à esquerda quando o veículo se aproximar, Figura 4.9 caso 2;
- Ambos os lados do veículo – a direcção da aproximação não é especificada, Figura 4.9 caso 3.

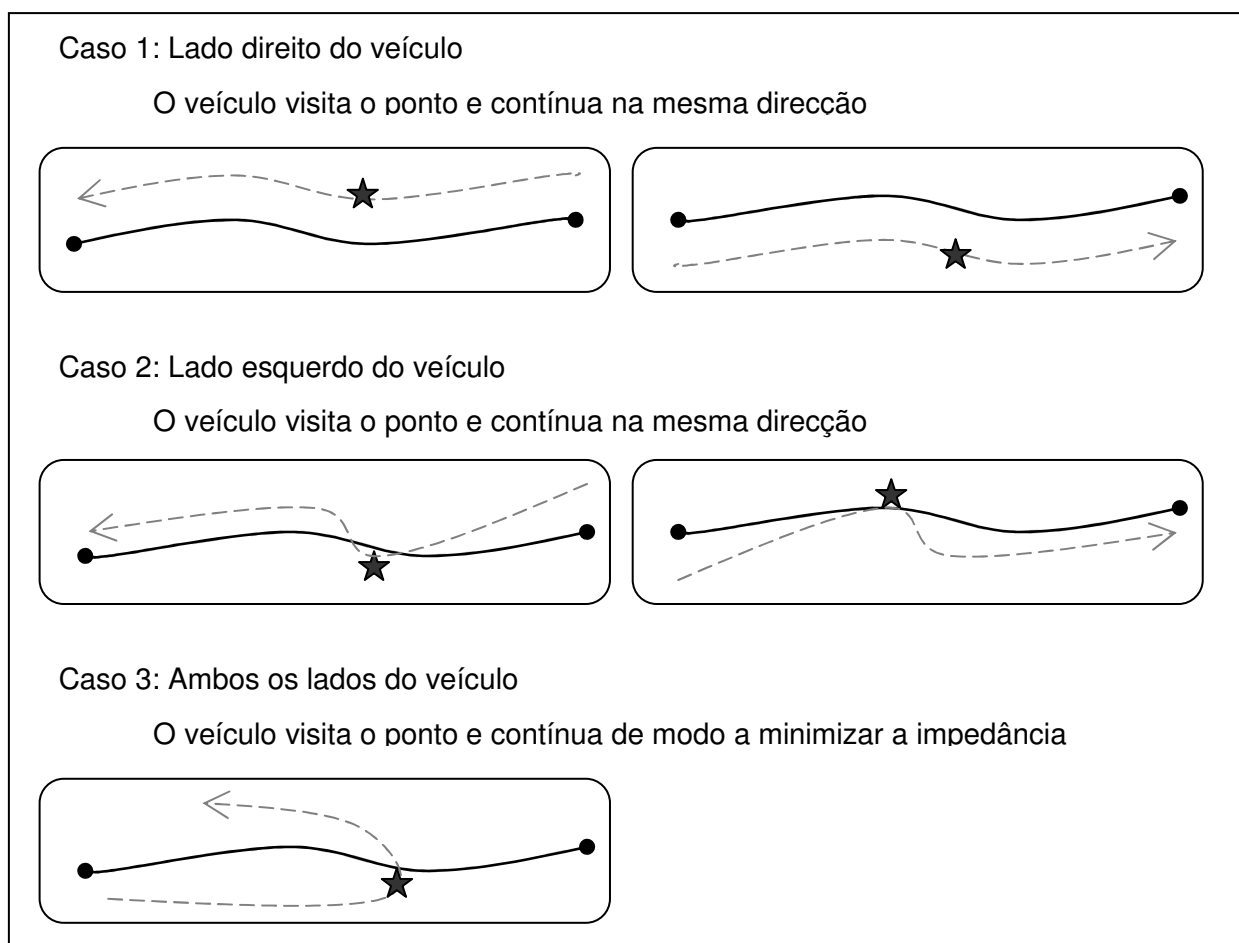


Figura 4.9 – Aproximação do veículo ao ponto a percorrer

No que diz respeito às propriedades relacionadas com aspectos temporais, nas localizações da rede podem ser definidas janelas de tempo e tempo de serviço afecto a cada ponto percorrido.

As janelas temporais definem o intervalo de tempo durante o qual aquele local deve ser visitado por um veículo. A introdução de janelas temporais requer duas propriedades: *TimeWindowStart* e *TimeWindowEnd*, que dizem respeito ao intervalo em deverá ocorrer a visita. O uso de janelas temporais pode afectar o custo total do percurso.

Como dados de saída o *software* fornece informações relativas ao tempo de chegada e partida a uma localização, tempo acumulado numa localização, tempo acumulado do percurso naquele ponto e, se aplicável, tempo violado, tempo de espera e tempo de espera acumulado.

4.4 APLICAÇÕES DO *NETWORK ANALYST*

Encontrar o melhor trajecto entre dois pontos de interesse (*Route*), encontrar o hospital mais próximo (*Closest Facility*), identificar a área de influência de um ponto específico (*Service Area*) ou servir um conjunto de pontos com uma frota de veículos (*Vehicle Routing Problem*) são exemplos de problemas de rede que o *Network Analyst* permite resolver. A Figura 4.10 apresenta as diferentes aplicações/funcionalidades do *Network Analyst*. As funcionalidades anteriores são apresentadas em formato de *layer*.

A construção da *Network Dataset* só é possível depois de validada a rede viária, pelo que uso do *Network Analyst*, em qualquer uma das aplicações, significa que se está a usar uma *Network Dataset* devidamente validada.

Para qualquer uma das funcionalidades, as *Network Locations* são introduzidas: interactivamente (através da ferramenta *Create Network Locations*), carregadas a partir de bases de dados existentes (*Feature Class*) ou carregadas a partir de endereços conhecidos (*Geocode*).

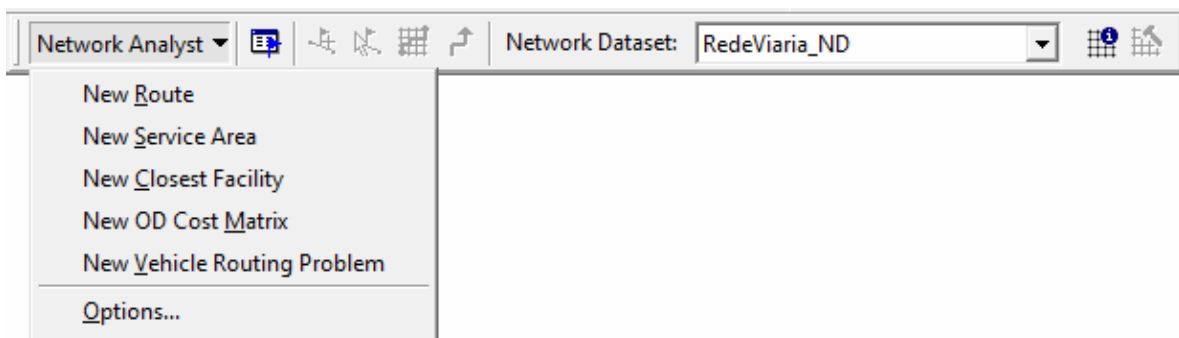


Figura 4.10 – Problemas solucionados com o *Network Analyst*

4.4.1 PERCURSOS ÓPTIMOS (*ROUTE*)

A aplicação *Route* do *Network Analyst* foi concebida para determinar o melhor trajecto entre dois pontos ou o melhor trajecto para visitar vários pontos.

Geralmente, procura-se o melhor percurso para percorrer um trajecto entre dois pontos ou o melhor percurso para visitar vários pontos. No entanto, o melhor percurso pode ter

diferentes significados, dependendo das circunstâncias. O melhor percurso pode ser o mais rápido ou o mais curto dependendo do objectivo a otimizar – minimizar tempo ou distância (ESRI, 2009).

O melhor percurso é definido como o percurso que otimiza uma determinada variável designada como impedância, por exemplo, tempo ou distância.

A Figura 4.11 apresenta as propriedades da *layer Route*. Esta solução permite optar pelas impedâncias tempo ou distância. O utilizador tem opção para definir a hora a que começa o percurso e o uso de janelas temporais.

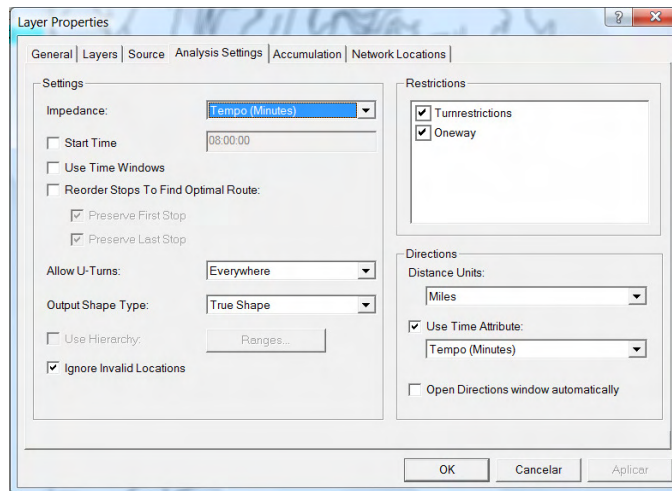


Figura 4.11 – Propriedades da *layer Route*

Para além de encontrar o melhor percurso entre dois pontos, o *Route* permite encontrar o melhor trajecto para percorrer vários pontos. Neste último caso, a solução permite:

- Encontrar o melhor trajecto para percorrer vários pontos seguindo uma ordem previamente conhecida;
- Encontrar o melhor trajecto, incluindo a melhor sequência, para percorrer vários pontos (semelhante ao problema do caixeiro-viajante que procura um circuito com a menor distância, começando numa qualquer cidade, entre várias, visitando cada cidade precisamente uma vez e regressando à cidade inicial).

Nesta funcionalidade a introdução das *Network Locations* é efectuada por uma das vias definidas no ponto 4.3.

4.4.2 ÁREAS DE INFLUÊNCIA (SERVICE AREA)

A aplicação *Service Area* do *Network Analyst* permite encontrar áreas de serviço de uma *Network Location*. A área de serviço é a região que engloba todas as estradas que se encontram dentro de determinada impedância relativamente a uma *Network Location*. Por exemplo, a área de serviço a 10 minutos de uma instalação inclui todas as estradas que podem ser percorridas num período de 10 minutos a partir dessa instalação.

É neste contexto que surge o conceito de acessibilidade, isto é, à facilidade de chegar a determinado local. No *Network Analyst* a acessibilidade pode ser medida em termos de tempo de trabalho ou distância. Avaliar a acessibilidade ajuda a responder a questões básicas como, quantas pessoas vivem a 10 minutos de carro de um cinema ou quantas pessoas vivem a meio quilómetro de distância a pé de uma loja de conveniência (ESRI, 2009).

Uma forma simples de avaliar a acessibilidade é através da análise de influência de um ponto. Por exemplo, encontrar a população que vive dentro de um raio de 5 quilómetros de um ponto local utilizando um círculo simples (*buffer*). No entanto, considerando que as pessoas viajam por estrada, este método não reflecte a acessibilidade do local. A solução *Service Area* do *Network Analyst* ultrapassou esta limitação identificando a rede viária acessível a 5 quilómetros de um ponto local por estrada.

A Figura 4.12 apresenta as propriedades da *layer Service Area*. A solução permite obter as direcções a partir da ou até à *Network Location*.

Nesta funcionalidade a introdução das *Network Locations* é efectuada por uma das vias definidas no ponto 4.3.

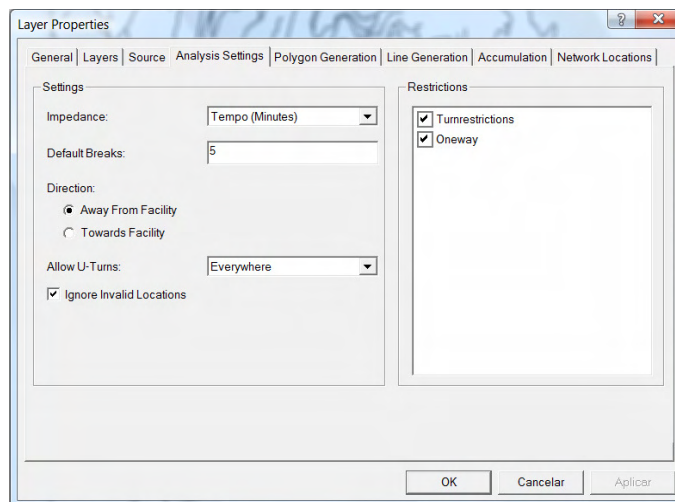


Figura 4.12 – Propriedades da *layer Service Area*

4.4.3 INSTALAÇÃO MAIS PRÓXIMA (*CLOSEST FACILITY*)

Encontrar o hospital mais próximo de um acidente, o carro de polícia mais próximo de um local de crime, ou a loja de conveniência mais próxima de um cliente, são exemplos de problemas que poderão ser solucionados através do *Closest Facility*. Por exemplo, numa situação de acidente, esta solução permite encontrar as unidades hospitalares mais próximas de acordo com a impedância introduzida. Face ao resultados o utilizador identifica a instalação mais próxima tendo como retorno as direcções do melhor percurso até à ou a partir dessa instalação (ESRI, 2009).

A Figura 4.13 apresenta as propriedades da *layer Closest Facility*.

Nesta funcionalidade a introdução das *Network Locations* é efectuada por uma das vias definidas no ponto 4.3.

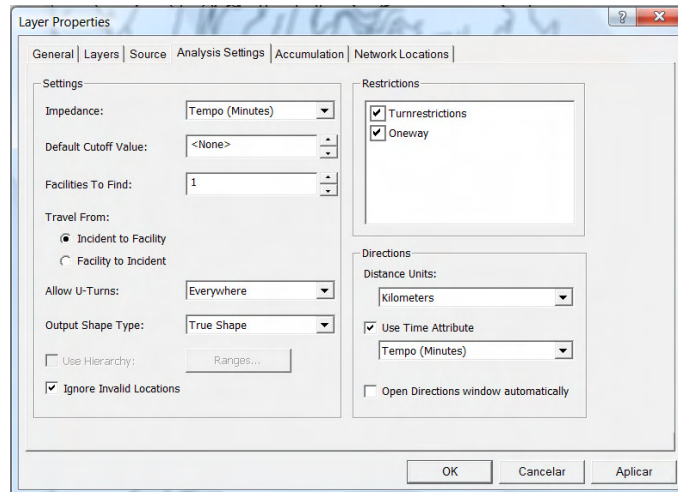


Figura 4.13 – Propriedades da *layer Closest Facility*

4.4.4 MATRIZ DE CUSTOS OD (OD COST MATRIX)

O *Network Analyst* cria matrizes de custo origem-destino (OD) de múltiplas origens até múltiplos destinos. Uma matriz de custo OD é uma tabela que contém a impedância da rede a partir de origem até cada destino, tendo em atenção que um local não pode ser simultaneamente origem e destino. Esta solução organiza os resultados por ordem crescente baseando-se na impedância mínima requerida para a viagem. É encontrado o melhor caminho da rede para cada origem-destino e o custo é armazenado numa tabela de atributos. O resultado da aplicação do *OD Cost Matrix* é um gráfico com um conjunto de linhas rectas aparentemente sem sentido.

As soluções *Closest Facility* e *OD Cost Matrix* são análises muito semelhantes; a grande diferença está na visualização dos resultados e na velocidade de cálculo. A solução *OD Cost Matrix* foi concebida para solucionar rapidamente um vasto número de problemas, no entanto, não contém informações que possam ser utilizadas para criar percursos perfeitos e instruções de direcção. Perante uma necessidade do cálculo de um percurso e instruções de direcção a solução passa pela utilização do *Closest Facility*, solução mais lenta do que o *OD Cost Matrix* (ESRI, 2009).

A Figura 4.14 apresenta as propriedades da *layer OD Cost Matrix*.

Nesta funcionalidade a introdução das *Network Locations* é efectuada por uma das vias definidas no ponto 4.3.

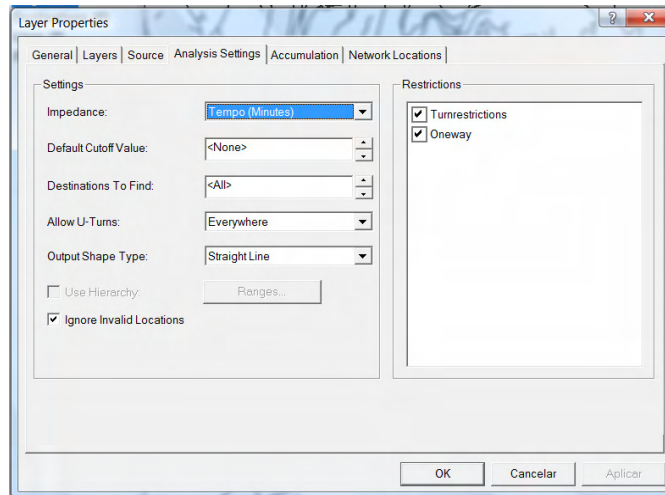


Figura 4.14 – Propriedades da *layer OD Cost Matrix*

4.4.5 PROBLEMA DE PERCURSOS DE VEÍCULOS (VEHICLE ROUTING PROBLEM)

4.4.5.1 OBJECTIVO DO *VRP*

Por exemplo, o responsável por uma empresa de distribuição de produtos, qualquer que seja a sua natureza, é muitas vezes confrontado com decisões sobre os percursos/trajectos dos veículos. Uma decisão a este nível envolve a melhor forma de organizar uma sequência de localizações (pontos de visita) a ser visitadas por um ou vários veículos, bem como a frequência e sequência de visitas. Este é um problema comum para ser resolvido pela aplicação *Vehicle Routing Problem (VRP)* do *Network Analyst*.

O principal objectivo desta solução é atender os pontos de visita, minimizando o tempo dos percursos a efectuar por cada veículo.

Assim, enquanto o objectivo da solução *Route* é encontrar o melhor percurso para um veículo, a solução *VRP* tem como objectivo encontrar os melhores percursos para um conjunto de veículos atendendo vários pedidos, isto é, determinar os percursos de vários circuitos. Além disso, dadas as inúmeras opções disponíveis, a solução *VRP* pode responder a problemas mais específicos, tais como, quantidades a atender por ponto a percorrer, pausas de trabalho de motoristas e custos de operação.

A solução *VRP* pretende fornecer um serviço de elevada qualidade respeitando janelas temporais e mantendo os custos globais de operação e investimento para cada percurso tão baixos quanto possível. As restrições permitem a representação mais rigorosa do problema, introduzindo elementos como a capacidade da viatura, tempo de trabalho a respeitar, horas de trabalho do motorista, velocidades e compromissos com os clientes. De facto, a solução *VRP* pode ser usada para determinar soluções de tarefas complexas de gestão de frotas com todas as restrições anteriormente referenciadas (ESRI, 2009).

4.4.5.2 APLICAÇÃO DO VRP

Na solução VRP, numa layer *Vehicle Routing Problem* é possível adicionar um ou vários percursos (sendo percurso sinónimo de trajecto ou viatura).

A Figura 4.15 apresenta os objectos de análise de rede disponíveis na tabela de conteúdos de uma layer *Vehicle Routing Problem*.

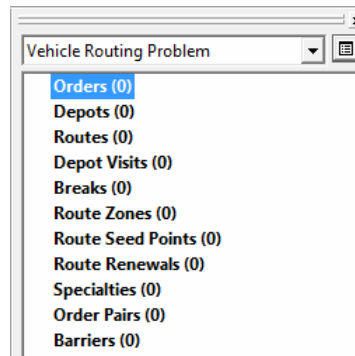


Figura 4.15 – Informação constante na tabela de conteúdos do VRP

As *Orders*, um dado de entrada, representam as localizações da rede a percorrer; por exemplo, no caso particular dos circuitos de recolha, constituem os pontos de recolha de resíduos.

Os *Depots* constituem igualmente um dado de entrada e dizem respeito aos pontos inicial e final do percurso e pontos de paragem intermédios para recarga ou descarga (consoante o problema) do veículo.

Os *Depot visits* constituem um resultado do *software* apresentado sob a forma de tabela, na qual constam as localizações inicial e final de cada percurso e, quando aplicável, paragens intermédias e características respectivas.

O percurso pode incluir pausas de trabalho. Os *Breaks* constituem um dado de entrada do *software*; permitem introduzir intervalos no cálculo do percurso, definir pausas de trabalho dos condutores, por exemplo.

O *software* permite associar um percurso a uma zona; o trajecto é induzido a percorrer uma região geográfica previamente definida. O *Route zones* constitui um dado de entrada do *software*; através da criação de polígonos esta opção permite criar zonas preferenciais a atribuir aos percursos.

O *Route seed points*, semelhante ao *Route zone*, permite definir não um polígono preferencial de recolha, mas uma área de recolha preferencial junto de um ponto de relevância.

O *Route renewals* constitui um dado de entrada do *software*; é o ponto de descarga caso seja excedida a capacidade da viatura, por exemplo.

Os veículos em análise poderão ser veículos com características particulares, *Specialties* (dado de entrada), tais como viaturas blindadas ou com arcas de refrigeração, exigindo a

formação adequada dos condutores. Os pontos a visitar por este tipo de veículos têm de estar bem definidos para serem atribuídos aos percursos adequados.

Os objectos da rede *Order Pairs* constituem um dado de entrada do *software*. Por vezes é requerido que recolha e distribuição estejam emparelhadas. Por exemplo, numa empresa de entrega de correspondência, a distribuição de um documento pode envolver duas paragens: uma para recolher o documento em determinado ponto e outra para entregá-lo no destino. Não é permitido atribuir apenas uma paragem ao percurso: tem de ser atribuído o par.

Os objectos da rede *Barriers* constituem um dado de entrada do *software*. As barreiras são usadas para representar locais onde não é possível a circulação, porque ocorreu um acidente ou uma estrada está cortada, por exemplo.

4.4.5.3 ESPECIFICIDADES DOS PERCURSOS

O objecto de análise de rede *Route* inclui os dados de entrada e resultados para cada percurso introduzido na análise (saliente-se que uma *layer* do *Vehicle Routing Problem* pode determinar ou um ou vários percursos). É aqui que são especificadas as características do veículo e do turno de trabalho, obtendo-se como resultado o trajecto entre os pontos de partida e chegada (*depots*) e os pontos de visita (*orders*). Na terminologia do *ArcGIS Network Analyst*, percursos, veículos ou condutores são sinónimos, e o termo percurso é usado para referir qualquer um dos três.

Na Figura 4.16 apresentam-se os dados de entrada e resultados por percurso a determinar.

Um percurso começa e termina num depósito (parque de viaturas), podendo iniciar e terminar em diferentes parques. Nalguns casos é necessário despender tempo nos pontos de partida e chegada do percurso para carga ou descarga do veículo. O total de tempo gasto nos pontos inicial e final do percurso é fixado para o trajecto e é especificado como tempo de serviço (*StartDepotServiceTime* e *EndDepotServiceTime*).

Um percurso pode obrigatoriamente ter de começar a hora determinada ou, pelo contrário, ter horário flexível, isto é, pode ter um intervalo de tempo para começar (*EarliestStartTime* e *LatestStartTime*). O intervalo de tempo de início do percurso e a janela temporal do local de partida são tidos em consideração na hora de início do percurso. Por defeito, o *software* assume valores para os parâmetros *EarliestStartTime* e *LatestStartTime*: 8:00h e 10:00h respectivamente, valores que o utilizador pode alterar.

O custo operacional para um percurso individual pode ser determinado em custos baseados no tempo (*CostPerUnitTime*), na distância (*CostPerUnitDistance*) e/ou despesas fixas independentes da quantidade de tempo trabalhado ou a distância percorrida (*FixedCost*).

Por exemplo, esporadicamente, numa situação de trabalho extra, pode haver um custo fixo associado ao aluguer de um veículo (*OvertimeStartTime*). Da mesma forma, o turno de trabalho é pago ao motorista incluindo ou excluindo horas extras e intervalos de almoço (*CostPerUnitOvertime*). Essas despesas podem ser utilizadas para especificar

custos de tempo e os custos de combustível podem ser usados para especificar os custos de distância.

O veículo pode ter capacidade limitada, o que restringe a quantidade que pode carregar. A característica *Capacities* especifica a capacidade do veículo.

Geralmente, os percursos têm tempo definido, dependendo da política de trabalho da empresa/organização, 7 ou 8 horas, por exemplo. O *software* permite introduzir este parâmetro (*MaxTotalTime*).

Além disso, os turnos de trabalho têm limitações relativamente ao número de horas que um funcionário pode conduzir, permitindo assim evitar incidentes por cansaço, por exemplo. O máximo tempo em viagem pode ser introduzido (*MaxTotalTravelTime*).

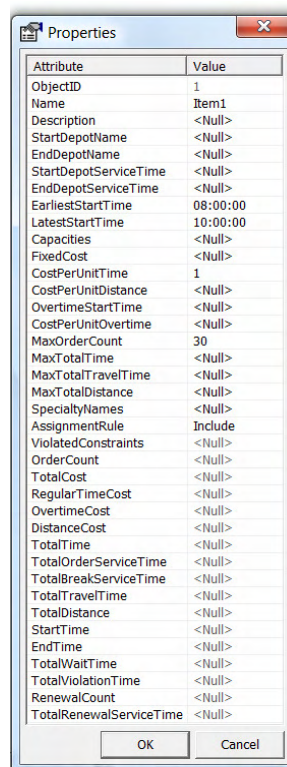


Figura 4.16 – Propriedades do objecto de análise da rede *route*

Os percursos são elementos lineares que podem ser exportados para outros *VRP* a partir de elementos lineares ou a partir de tabelas. Para qualquer dos tipos de entrada, os percursos podem ser adicionados com o comando *Load Locations*.

A Figura 4.17 apresenta as propriedades da *layer VRP*. Refere-se novamente que o objectivo da solução do *VRP* é resolver o problema de modo a minimizar o tempo (*Time Attribute*). Assim, nesta solução a distância aparece como um parâmetro opcional, isto é, pode aparecer mas não tem influência no cálculo, pois o *VRP* resolve o problema de modo a minimizar o tempo.

A Figura 4.18 (a) ilustra o procedimento de adição de percursos ao *VRP*. Em (b) apresenta-se um *VRP* com um circuito e em (c) um *VRP* com três circuitos.

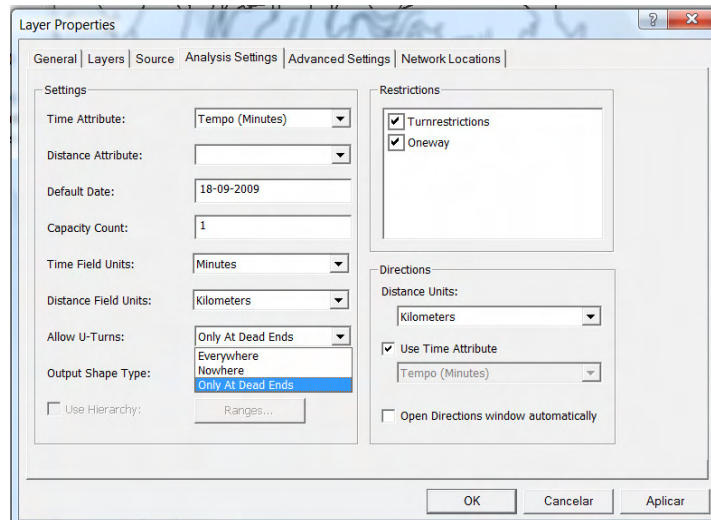


Figura 4.17 – Propriedades da *layer* VRP

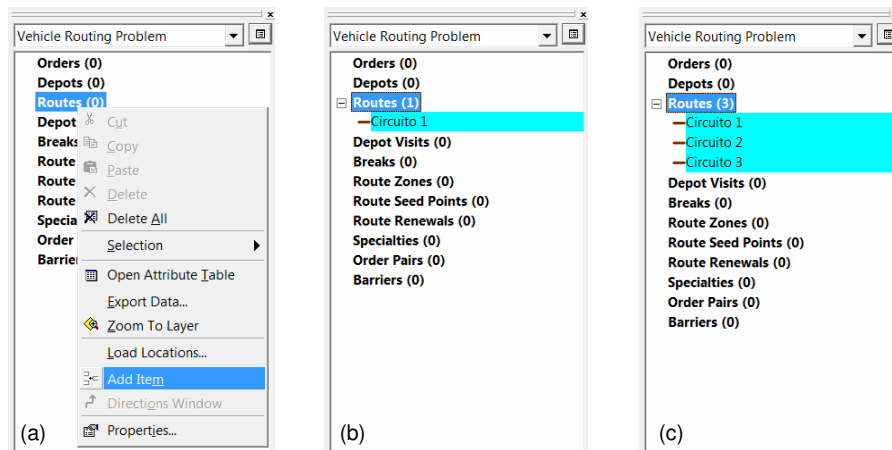


Figura 4.18 – Adição de percursos: (a) modo de criação do circuito; (b) VRP com um circuito; (c) VRP com três circuitos

4.5 ALGORITMOS USADOS PELO *NETWORK ANALYST*

Os algoritmos utilizados pelo *ArcGIS Network Analyst* para solucionar os percursos óptimos incluem

- Algoritmo de *Dijkstra*, algoritmo exacto; e
- Pesquisa Tabu, algoritmo metaheurístico,

tendo em atenção que o respectivo uso depende da aplicação em causa.

4.5.1 INSTALAÇÃO MAIS PRÓXIMA, MATRIZ DE CUSTOS OD E ÁREA DE INFLUÊNCIA (CLOSEST FACILITY, OD COST MATRIX, SERVICE AREA)

As aplicações *Closest Facility*, *OD Cost Matrix* e *Service Area* baseiam-se no algoritmo de *Dijkstra*.

Para ser utilizado num contexto real de transporte, o algoritmo de *Dijkstra* foi modificado de modo a respeitar restrições, tais como sentido das vias, proibições, barreiras e constrangimentos de sentidos de via. Além disso, o algoritmo foi preparado de modo a permitir modelar as localizações na rede em qualquer lugar da rede, e não apenas nos nós (junções).

O *software* permite reconhecer o caminho mais curto ou o caminho mais rápido aplicando a hierarquia da rede.

Encontrar exactamente o caminho mais curto numa rede viária, incluindo todas as vias, é uma operação demorada devido à quantidade elevada de linhas que constituem a rede. Para melhorar o desempenho da operação a *Network Dataset* permite modelar a hierarquia no sistema de transporte dando prioridade à circulação em estradas de hierarquia superior. O *software* de rede suporta até três níveis hierárquicos para vias de trânsito – estradas principais, estradas complementares, estradas locais.

O objectivo de uma *Network Dataset* hierarquizada é minimizar a impedância. De entre os pontos de partida e chegada, bem como pontos a atender, quando aplicável, a *Network Dataset* procura otimizar o percurso por estradas de nível superior.

Como a pesquisa está restringida a hierarquia superior (por exemplo, estrada itinerário principal) é excluído um grande número de estradas de nível inferior (por exemplo, estradas locais), o que resulta num desempenho mais rápido no cálculo do percurso. Salienta-se que em causa está um algoritmo heurístico; o seu objectivo é ter um rápido desempenho e boas soluções, mas não garante que a solução encontrada é a solução óptima. Geralmente faz sentido utilizar o VRP sobre uma rede hierarquizada quando a rede viária pesa no tempo de trabalho, por exemplo, a circulação por auto-estrada é mais rápida reduzindo tempos de percurso.

4.5.2 PERCURSO ÓPTIMO (ROUTE)

O *Route* é uma solução que foi concebida com o objectivo de determinar o melhor percurso entre dois pontos ou entre um conjunto de pontos. Como já foi referido, relativamente à segunda opção, a solução permite:

1. Encontrar o melhor trajecto para percorrer vários pontos seguindo uma ordem previamente conhecida;
2. Encontrar o melhor trajecto, incluindo a melhor sequência, para percorrer vários pontos.

Para encontrar o melhor trajecto a percorrer na visita a um conjunto de pontos seguindo uma ordem previamente conhecida o *route* utiliza o algoritmo de *Dijkstra*.

A formulação do melhor trajecto para percorrer um conjunto de pontos cuja sequência é desconhecida corresponde ao problema do caixeiro-viajante. Como mencionado anteriormente, o problema do caixeiro-viajante é um problema combinatório, isto é, não há uma forma simples para encontrar a sequência óptima. Utiliza heurísticas para encontrar boas soluções para este tipo de problemas com o mínimo tempo.

Baseado no algoritmo de *Dijkstra*, o problema do caixeiro-viajante começa por gerar uma matriz de custos origem-destino entre todas as localizações da rede a ser percorridos. Posteriormente, com base na Pesquisa Tabu é identificada a melhor sequência de visita. A Pesquisa Tabu é um algoritmo metaheurístico para resolver problemas combinatórios.

A implementação do problema do caixeiro-viajante a partir do *Network Analyst* permite a utilização de janelas temporais nas *Network Locations*. A solução tem em consideração as horas de abertura e fecho dos pontos de visita, obtendo-se um percurso que atende todas as localizações com o mínimo atraso.

4.5.3 PROBLEMA DE PERCURSOS DE VEÍCULOS (VEHICLE ROUTING PROBLEM)

O *VRP* é um conjunto de vários problemas do caixeiro-viajante. No problema do caixeiro-viajante um conjunto de pontos de visita é visitado de forma otimizada. No *VRP* um conjunto de pontos de visita tem de ser atribuído a um conjunto de veículos minimizando os custos dos percursos.

O *VRP* inclui restrições a respeitar, tais como a capacidade dos veículos e janelas temporais de visita, gerando uma solução que respeita aquelas restrições enquanto minimiza uma função objectivo composta por custos operacionais e preferência dos utilizadores.

A função *VRP* começa por gerar uma matriz de custos origem-destino entre todas as localizações da rede (pontos de partida e chegada e locais a visitar), baseada no algoritmo de *Dijkstra*. Utilizando esta matriz de custos, e com base no algoritmo metaheurístico Pesquisa Tabu, é construída uma solução inicial atribuindo-se os pontos de visita ao percurso mais adequado. Posteriormente, a solução inicial é então melhorada pela troca dos pontos de visita entre percursos (ESRI, 2009).

A implementação exacta da metaheurística Pesquisa Tabu do *ArcGIS Network Analyst*, utilizada para encontrar a melhor sequência de visita, é propriedade privada da ESRI. Esta solução tem sido intensamente investigada e desenvolvida pelo proprietário no sentido de melhorar continuamente os resultados obtidos com a aplicação do *software* (ESRI, 2009).

5 CASOS DE ESTUDOS

O presente capítulo apresenta a aplicação do *ArcGIS Network Analyst* versão 9.3 num estudo de optimização de recolha de resíduos urbanos.

5.1 INFORMAÇÃO DE BASE

O caso prático que foi objecto deste estudo diz respeito ao Sistema de Recolha de Resíduos da Região Autónoma da Madeira (RAM), fluxo indiferenciado, tendo em vista a redução de custos, nomeadamente através da reorganização estratégica do sistema de recolha em vários cenários.

Querer atingir economias de escala levou os responsáveis pelo sistema de gestão de resíduos da RAM a questionar as vantagens técnicas e económicas de uma recolha integrada de resíduos urbanos preterindo o actual sistema de recolha, de âmbito municipal.

Para o efeito, foi considerado pelas entidades responsáveis pela gestão dos RU que o objectivo do estudo deveria ser não a tipologia dos meios de deposição, nem frequências de recolha (aspectos constantes em todos os cenários), mas a optimização da recolha numa perspectiva de passar de uma gestão municipal para uma gestão integrada. Perspectiva-se assim, eliminar os constrangimentos de recolha de cada município, em particular os que derivam da recolha em locais de fronteira com municípios vizinhos.

O estudo do Sistema de Recolha de Resíduos da RAM envolveu o traçado de circuitos com a aplicação do *Network Analyst*.

A RAM é constituída pelas ilhas da Madeira e do Porto Santo compreendendo onze concelhos: Calheta, Câmara de Lobos, Funchal, Machico, Ponta do sol, Porto Moniz, Porto Santo, Ribeira Brava, Santana, Santa Cruz e São Vicente. A Figura 5.1 apresenta os municípios da RAM.

Segundo as estimativas de população residente em 31/XII/2008 do INE, a RAM acolhe 247 161 habitantes, distribuídos por concelho de acordo com o Quadro 5.1, e uma densidade populacional de cerca de 308,5 hab./km². Cerca de 75% da população da ilha da Madeira habita em apenas 35% do território, sobretudo na costa sul, onde se encontra a cidade do Funchal, capital da RAM, que concentra 40% da população (cerca de 98 600 habitantes).

A RAM caracteriza-se por possui um relevo bastante acidentado, sendo os pontos mais altos o Pico Ruivo (1 862m), Pico das Torres (1 851m) e o Pico do Areeiro (1 818m). A costa Norte é dominada por altas arribas e a Oeste surge uma região planáltica, o Paul da Serra (1 300 - 1 500 m).



Figura 5.1 – Região Autónoma da Madeira

Quadro 5.1 – Caracterização demográfica da RAM (2008)

	População	
	hab	
Calheta	11 907	5%
Câmara de Lobos	36 119	15%
Funchal	98 583	40%
Machico	21 032	9%
Ponta do Sol	8 359	3%
Porto Moniz	2 645	1%
Ribeira Brava	12 600	5%
Santa Cruz	37 121	15%
Santana	8 277	3%
São Vicente	6 117	2%
Porto Santo	4 401	2%
Região Autónoma da Madeira	247 161	100%

5.2 SISTEMA DE GESTÃO DE RU NA RAM

5.2.1 RECOLHA INDIFERENCIADA E SELECTIVA DE RESÍDUOS

Actualmente, a operação de recolha de resíduos na RAM é de âmbito municipal, isto é, cada município é responsável pela recolha dos seus resíduos, quer indiferenciada, quer selectiva.

Em 2008 a recolha de resíduos na RAM, indiferenciados e selectivos, rondou as 134 336 toneladas, correspondendo 13,4% a resíduos provenientes via recolha selectiva multimaterial. Na Figura 5.2 apresentam-se os resíduos indiferenciados e selectivos recolhidos por município. Salienta-se que o concelho do Funchal é responsável pela produção de mais de 50% dos resíduos.

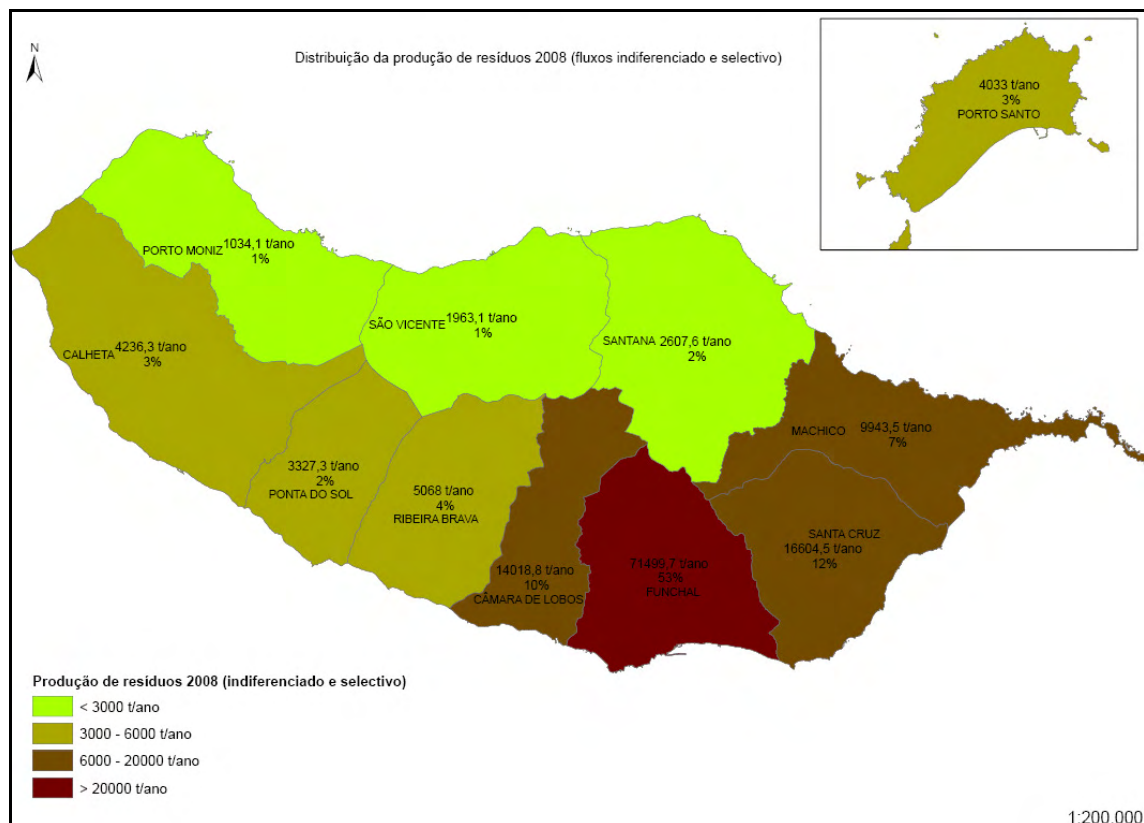


Figura 5.2 – Distribuição espacial da produção de resíduos por concelho (2008)

5.2.2 TRANSFERÊNCIA DE RESÍDUOS NA RAM

Dependendo da zona geográfica a que está afecto, cada município entrega os resíduos numa das estações de transferência da RAM.

As estações de transferência de resíduos da RAM são quatro:

1. Estação de Transferência da Zona Oeste (ETZO)

2. Estação de Transferência da Zona Leste (ETZL)
3. Estação de Transferência do Funchal (ETF)
4. Centro de Processamento de Resíduos de Porto Santo (CPRS)

Actualmente a ETZO recebe os resíduos urbanos, indiferenciados e selectivos, dos concelhos da Calheta, Ponta do Sol, Porto Moniz, Ribeira Brava e São Vicente. Para a ETZL vão os resíduos urbanos, indiferenciados e selectivos, dos concelhos de Machico, Santa Cruz e Santana.

O concelho do Funchal tem uma estação de transferência própria, recursos humanos e materiais afectos à recolha e gestão dos seus resíduos. Além dos resíduos do Funchal, a ETF recebe também os resíduos indiferenciados do concelho de Câmara de Lobos. Os resíduos selectivos de Câmara de Lobos são enviados directamente para Estação de Triagem, localizada fisicamente junto da EZTL.

Os resíduos produzidos na ilha de Porto Santo (fluxos indiferenciado e selectivo) são entregues no CPRS de Porto Santo, sendo posteriormente enviados para a ETZL.

A Figura 5.3 apresenta as áreas servidas por cada uma das estações de transferência. Salienta-se que 62% dos resíduos recolhidos são recebidos na ETF (provenientes do Funchal e Câmara de Lobos); 23% dos resíduos são entregues na ETZL (Machico, Santana e Santa Cruz); 12% dos resíduos são recepcionados na ETZO (Porto Moniz, Calheta, Ponta do Sol, São Vicente e Ribeira Brava); e apenas 3% dos resíduos são recebidos no CPRS (Porto Santo).

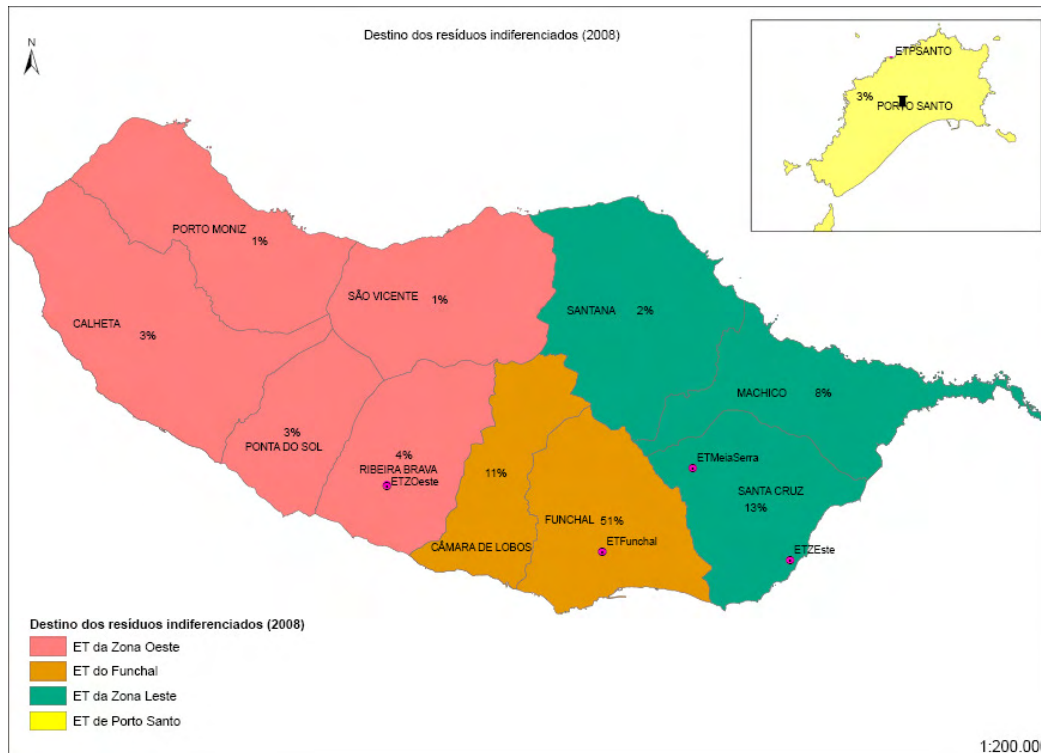


Figura 5.3 - Destino dos resíduos indiferenciados

5.2.3 TRATAMENTO DE RESÍDUOS NA RAM

Das estações de transferência os resíduos indiferenciados são enviados para a Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos da Meia Serra (ETMS). Os processos de gestão de resíduos que integram a ETMS são: instalação de incineração de resíduos urbanos e aterro sanitário.

Os resíduos recolhidos selectivamente são enviados para a Estação de Triagem de Porto Novo, onde são recepcionados, triados, acondicionados e encaminhados para o Continente.

5.3 MODELOS DE GESTÃO DE RECOLHA

Para efeitos de discussão da aplicação do *Network Analyst* à operação de recolha de resíduos indiferenciados, foram considerados três cenários organizacionais estratégicos analisados no estudo de Optimização do Sistema de Recolha de Resíduos da RAM:

- Modelo A, corresponde à situação de referência e refere-se aos actuais circuitos de recolha de resíduos indiferenciados na RAM. Neste modelo cada município é responsável pela recolha dos seus resíduos, entregando-os nas Estações de Transferência afectas à sua zona geográfica, com excepção da autarquia de Câmara de Lobos, cujos resíduos provenientes das recolhas são entregues na Estação de Transferência do Funchal (ETF);
- O Modelo B, refere-se à recolha de resíduos integrada e centralizada num único sistema de gestão de RU da RAM, organizado em 3 subsistemas – Subsistema Este (Machico, Santana e Santa Cruz), Oeste A (Calheta, Porto Moniz, Ponta do Sol, Ribeira Brava, São Vicente e Câmara de Lobos) e Porto Santo. Neste modelo a recolha passa a ser integrada, envolvendo vários municípios, sendo os resíduos entregues nas Estações de Transferência afectas à sua zona geográfica;
- O Modelo C, refere-se à recolha de resíduos integrada e centralizada num único sistema de gestão de RU da RAM, organizado em 4 subsistemas – Subsistema Este (Machico, Santana e Santa Cruz), Oeste B (Calheta, Porto Moniz, Ponta do Sol, Ribeira Brava e São Vicente), Câmara de Lobos e Porto Santo, sendo os resíduos entregues nas Estações de Transferência afectas à sua zona geográfica; no Subsistema de Câmara de Lobos os resíduos serão entregues na ETZO.

Em qualquer dos cenários os resíduos indiferenciados produzidos na ilha de Porto Santo são entregues no CPRS de Porto Santo, sendo posteriormente enviados para a ETZL.

Salienta-se que o estudo de Optimização do Sistema de Recolha de Resíduos da RAM não incluiu o Funchal. Este concelho tem uma estrutura bem definida de gestão de resíduos (equipamento e recursos humanos), optando por manter-se independente nesta matéria.

Independentemente da estratégia implícita nos modelos organizacionais referidos, partiu-se do princípio de que a área geográfica afecta a cada uma das estações de transferência poderia não conduzir a uma solução técnica e economicamente viável.

Assim, com base nas soluções do *Network Analyst* foi realizada uma análise espacial que relaciona a proximidade entre parques de viaturas – estações de transferência – estação de tratamento. Esta análise, em conjunto com pressupostos, quer técnicos, quer económicos, funcionaram como instrumento de apoio à decisão na optimização do traçado dos circuitos. O presente trabalho apresenta parte dessa análise.

A análise dos Modelos B e C envolveu o traçado dos circuitos com a aplicação *Network Analyst*. O estudo da situação actual, designadamente identificação e caracterização de recursos afectos (quer humanos, quer materiais) e identificação e caracterização dos circuitos (tempos, distâncias e velocidades), foi realizado com base em elementos facultados pelos técnicos dos municípios e nos dados constantes nas fichas de controlo de circuitos, cujo preenchimento foi solicitado aos motoristas durante a execução de cada circuito.

Pretendia-se que a situação actual funcionasse como referência para que houvesse termo de comparação com os cenários organizacionais estratégicos estudados. Aplicar o *Network Analyst* aos circuitos actuais seria desde logo uma alteração aos trajectos, uma vez que o *software* não faz exactamente o mesmo percurso, tendo influência nas características finais dos circuitos inviabilizando uma análise comparativa.

Actualmente, o regime de trabalho da operação de recolha de resíduos da RAM (Modelo A) inclui horas extraordinárias, agravando ainda mais o custo já elevado da operação de recolha de resíduos.

No estudo dos Modelos B e C considerou-se não haver horas extraordinárias, além das 7 horas da jornada de trabalho. As equipas de recolha de RU indiferenciados são constituídas por três elementos – 1 motorista e 2 cantoneiros.

Numa óptica de minimização de custos, efectuou-se o diagnóstico de necessidades de viaturas para um funcionamento 5 dias/semana (de segunda a sexta-feira) e 6 dias/semana (de segunda a sábado). Verificou-se ser economicamente mais vantajoso a recolha 6 dias/semana, pois os custos acrescidos com um maior número de viaturas para a recolha 5 dias/semana eram superiores aos valores pagos por horas extraordinárias (redução de custos da ordem dos 20%).

5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ACTUAIS CIRCUITOS

Os elementos recolhidos nas fichas de controlo de circuitos preenchidas pelos motoristas durante a execução dos circuitos permitiram caracterizar os actuais circuitos de recolha indiferenciada da RAM. Assim, para cada circuito (excepto o concelho do Funchal) identificou-se: origem, destino e zona abrangida pelo circuito; viatura de execução do circuito; frequência, horário e duração do circuito; número de pontos de recolha e número de contentores incluídos no circuito e respectiva capacidade; e volume disponível.

A título de exemplo, apresentam-se no Quadro 5.2 os actuais circuitos de recolha indiferenciada no concelho de Santa Cruz. O atributo relativo à designação do município diz respeito à terminologia usada pelo município para identificar os circuitos. No caso

particular de Santa Cruz, os circuitos estão organizados por freguesias. Neste sentido, a zona abrangida diz respeito às freguesias.

O concelho de Santa Cruz tem cerca de 37 000 habitantes, 15% da população da RAM.

Além dos elementos referidos, foram levantados indicadores de execução dos circuitos de recolha indiferenciada da RAM, que viriam a ser usados como dado de entrada no *software Network Analyst*. Entre os indicadores identificados destaca-se a velocidade.

O Quadro 5.3 apresenta os indicadores de execução dos circuitos de recolha indiferenciada do concelho de Santa Cruz.

Quadro 5.2 – Caracterização dos actuais circuitos de recolha indiferenciada do concelho de Santa Cruz

Designação do Município	Zona abrangida	VG	VP	Início do circuito	Destino dos resíduos	Frequência de recolha semanal	2ª F	3ª F	4ª F	5ª F	6ª F	Sáb	Dom	Horário	Início	Fim	Duração	Equipa	Referência	Nº de pontos de recolha	1100 L	800 L	770 L	380 L	240 L	120 L	110 L	80 L	Volume disponível
Circuito 1-A G	Campo	x		PV	ETZL	2	x			x				D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC01VG2D	165	4	105	12	0	69	253	0	0	144 560
Circuito 1-B G	Campo	x		PV	ETZL	2		x			x			D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC02VG2D	147	7	88	0	0	159	482	0	0	174 100
Circuito 1-C G	Campo	x		PV	ETZL	3		x				x		D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC03VG3D	28	1	68	0	3	22	57	0	0	68 700
Circuito 1-D G	Campo	x		PV	ETZL	2			x					D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC04VG2D	103	23	98	1	0	98	345	0	0	169 390
Circuito 1-A +1-D G	Campo	x		PV	ETZL	1						x		D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC05VG1D	193	9	133	13	0	99	301	0	0	186 190
Circuito 1-A P	Campo		x	PV	ETZL	2				x				D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC06VP2D	78	2	45	4	0	26	106	0	0	60 240
Circuito 1-B P	Campo		x	PV	ETZL	2					x			D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC07VP2D	58	4	36	0	0	52	147	0	0	63 320
Circuito 1-E P	Campo		x	PV	ETZL	2			x					D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC08VP2D	94	1	36	4	0	9	139	0	0	51 820
Circuito 1-F P	Campo		x	PV	ETZL	2					x			D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC09VP2D	63	1	38	0	0	44	199	0	0	65 940
Circuito 2-B G	Santa Cruz	x		PV	ETZL	3				x				D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC10VG3D	123	12	126	3	0	6	43	0	0	122 910
Circuito 2-A P	Santa Cruz		x	PV	ETZL	6		x	x	x				D	15:00	21:30	6:30	1M+2A	SC11VP6D	57	1	22	0	0	19	66	0	0	31 180
Circuito 2-B P	Santa Cruz		x	PV	ETZL	3				x				D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC12VP3D	132	3	111	3	0	10	45	0	0	102 210
Circuito 3-AB G	Camacha		x	PV	ETMS	3					x			D	15:00	21:30	6:30	1M+2A	SC13VG3D	146	7	92	37	0	28	40	3	0	121 640
Circuito 3-AB P	Camacha		x	PV	ETMS	3					x			D	15:00	21:30	6:30	1M+2A	SC14VP3D	123	4	77	11	0	6	58	0	0	82 870
Circuito 4-AB G	Santo António da Serra		x	PV	ETZL	2					x			D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC15VG2D	72	3	61	0	0	5	11	0	0	54 620
Circuito 4-AB P	Santo António da Serra		x	PV	ETZL	2					x			D	8:00	14:30	6:30	1M+2A	SC16VP2D	74	0	53	7	0	1	13	0	0	49 590
Circuito 5-AB G	Goaia		x	PV	ETZL	2					x			D	15:00	21:30	6:30	1M+2A	SC17VG2D	65	7	60	1	0	4	8	0	0	58 390
Circuito 5-AB P	Goaia		x	PV	ETZL	2					x			D	15:00	21:30	6:30	1M+2A	SC18VP2D	84	1	71	1	0	12	84	0	0	71 630
18		9	9																	1807	90	1 320	97	3	669	2 397	3	0	1 694 300

PV – parque de viaturas; D – diurno; VP e P – viatura pequena (5m³); VG e G – viatura grande (20m³); ET – Estação de transferência;

Quadro 5.3 – Indicadores de execução dos circuitos de recolha indiferenciada do concelho de Santa Cruz

Referência	Duração	Semana de controlo										Nº idas à ET								
		Distâncias médias (km)					Tempos médios (h)					Velocidades médias (km/h)					Quantidades médias recolhidas			
		Total	Em transporte	Em recolha	Total	Em transporte	Em recolha	Em transporte	Em recolha	Em transporte	Em recolha	Do PV à ET	Da ET ao PV	kg/circuito	kg/km	kg/ho	kg/ha			
SC01VG2D	6:30	57	14	44	6:47	0:39	5:42	0:25	8	21	8	8	32	1	8 630	151	52	17		
SC02VG2D	6:30	46	21	26	7:05	0:52	6:02	0:10	6	27	4	6	20	1 ou 2	9 790	213	67	18		
SC03VG3D	6:30	47	19	28	6:23	0:55	5:15	0:12	7	25	5	7	18	2	10 387	223	358	7		
SC04VG2D	6:30	43	19	24	6:45	0:26	6:00	0:18	6	42	4	6	38	1	9 780	230	95	17		
SC05VG1D	6:30	70	20	50	5:49	0:59	4:35	0:15	12	19	11	12	15	1	5 840	83	30	32		
SC06VP2D	6:30	44	15	29	6:04	0:52	4:56	0:16	7	24	6	7	22	2 ou 3	5 340	123	68	11		
SC07VP2D	6:30	54	22	32	6:07	0:51	5:09	0:06	9	33	6	9	13	2 ou 3	4 360	81	75	15		
SC08VP2D	6:30	83	24	59	6:12	0:50	5:16	0:05	13	29	11	13	21	3	4 620	56	49	11		
SC09VP2D	6:30	64	20	44	6:20	0:45	5:23	0:11	10	28	8	10	24	2 ou 3	4 370	89	69	15		
SC10VG3D	6:30	62	10	52	6:00	0:21	5:10	0:29	10	27	10	11	26	1	5 100	83	41	24		
SC11VP6D	6:30	25	14	11	3:29	0:28	2:52	0:08	7	29	4	6	27	1	2 192	88	38	14		
SC12VP3D	6:30	62	17	45	5:51	0:38	5:03	0:10	11	38	9	11	29	2	3 620	56	27	28		
SC13VG3D	6:30	77	30	47	6:25	1:17	4:53	0:14	12	32	10	11	20	1	8 477	110	58	14		
SC14VP3D	6:30	76	30	46	6:11	0:55	5:04	0:12	12	37	9	12	45	2	3 813	50	31	22		
SC15VG2D	6:30	81	27	54	5:50	0:57	4:42	0:10	14	29	11	12	27	1	5 850	73	81	9		
SC16VP2D	6:30	75	18	57	6:32	0:40	5:40	0:12	11	34	10	11	24	2	3 060	41	41	16		
SC17VG2D	6:30	59	12	47	6:15	0:42	5:20	0:12	9	17	9	9	18	1	8 140	138	125	7		
SC18VP2D	6:30	70	15	56	6:45	1:10	5:26	0:09	10	21	10	10	35	2 ou 3	4 040	56	48	18		

5.4 DEFINIÇÃO DA REDE VIÁRIA (NETWORK DATASET)

A operação de recolha de resíduos é condicionada pelas características de relevo da Ilha, extremamente montanhosa. Em causa está uma rede com declives elevados, onde passagens inferiores (túneis) são uma constante. Adicionalmente, há estradas que por serem demasiado estreitas estão condicionadas à circulação de veículos de maior capacidade.

Conhecida a importância da integridade da rede viária para a representação de circuitos de recolha recorrendo ao *software*, foi fundamental actualizar a infra-estrutura viária da RAM (actualizar porque já existia uma base de dados com a rede viária e respectivos atributos).

A recolha de resíduos na RAM tem uma particularidade: existem circuitos efectuados por viaturas grandes (viaturas com capacidade igual a 20m³), que percorrem as vias principais, apoiadas por circuitos efectuados por viaturas pequenas, que recolhem locais de difícil acesso (viaturas com capacidade menor ou igual a 5m³). Regra geral, as viaturas pequenas vão descarregar os resíduos nas estações de transferência contudo, pontualmente, num dos concelhos as viaturas pequenas despejam para as viaturas grandes.

5.4.1 DIGITALIZAÇÃO DA REDE VIÁRIA

Os atributos usados para caracterizar cada elemento da rede foram os descritos na Figura 5.4 e Quadro 5.4.

OBJECTID	Shape *	CLASSE	ONEWAY	F ELEV	T ELEV	SEPARADOR	VIATURA	NAME	ONEWAY NET	Shape Length	Velocidade km/h	Tempo min
1	Polyline	OE		0	0	0	2	V320100001		112,747846	11	0,614988
2	Polyline	EM	FT	0	0	0	1	V320100002		73,850927	11	0,402823
3	Polyline	OE		0	0	0	1	V320100003		37,964036	11	0,207077
4	Polyline	EM	FT	0	0	0	1	V320100004		74,33498	11	0,405464
5	Polyline	EM	FT	0	0	0	1	V320100005		39,793777	11	0,217057
6	Polyline	OE		0	0	0	1	V320100006		164,837015	11	0,899111
7	Polyline	EM		0	0	0	1	V320100007		298,748614	11	1,629538
8	Polyline	EM		0	0	0	1	V320100008		40,361342	11	0,220153
9	Polyline	OE		0	0	0	1	V320100009		42,679814	11	0,232799
10	Polyline	EM		0	0	0	1	V320100010		38,896647	11	0,212164
11	Polyline	EM		0	0	0	1	V320100011		116,66721	11	0,636367
12	Polyline	EM		0	0	0	1	V320100012		34,452972	11	0,187925
13	Polyline	EM	FT	0	0	0	1	V320100013		44,269678	11	0,241471
14	Polyline	OE		0	0	0	1	V320100014		20,567315	11	0,112185
15	Polyline	EM	FT	0	0	0	1	V320100015		65,19961	11	0,355634
16	Polyline	EM	FT	0	0	0	1	V320100016		22,03787	11	0,120207
17	Polyline	OE		0	0	0	1	V320100017		609,218236	11	3,323009
18	Polyline	OE		0	0	0	1	V320100018		246,850389	11	1,346457
19	Polyline	OE		0	0	0	1	V320100019		115,744259	11	0,631332

Figura 5.4 - Atributos da rede viária

Quadro 5.4 – Atributos da rede viária

Atributo	Propriedades	Descrição	Observações
OBJECTID	Object ID	Identificador único sequencial e dinâmico	Atributo automático
Shape	Geometry	Entidades do tipo linha ou arco	Atributo automático
CLASSE	Text	Classificação da hierarquia da rede viária. Possui dados apenas de referência Valores: ER – Estradas Regionais; EM – Estradas Municipais; OE – Outras Estradas	
ONEWAY	Text	Sentido de circulação viária para as viaturas de recolha de resíduos. Valores: FT – Sentido único no sentido de digitalização da linha; TF – Sentido único no sentido contrário ao de digitalização da linha; Vazio – Dois sentidos	
F_ELEV	Long Integer	Estes dois atributos definem a conexão entre linhas. Quando duas linhas têm um vértice comum, a circulação entre ambas só é possível se nas extremidades das linhas que constituem o vértice comum a elevação for igual. F_ELEV é o valor de elevação referente ao ponto de início no sentido da digitalização do arco e T_ELEV é o valor de elevação referente ao ponto de fim. Valores: -1 – Nível inferior; 0 – Superfície; 1 – Nível superior	
T_ELEV	Long Integer		
SEPARADOR	Long Integer	Existência de separador central no eixo viário. Valores: 0 – Inexistência; 1 – Existência de separador.	
VIATURA	Long Integer	Tipo de viatura de recolha de resíduos que consegue circular no arco. Valores: 1 – Viatura grande; 2 – Viatura pequena	
NAME	Text	Na ausência de informação relativa ao nome das vias da RAM foi criado um identificador que resulta da concatenação da letra “V”, do código de concelho do INE composto por 4 dígitos (DDCC), e um código de 5 algarismos	
ONEWAY_NET	Text	Sentido de circulação viária. Valores: FT – Sentido único no sentido de digitalização da linha; TF – Sentido único no sentido contrário ao de digitalização da linha; Vazio – Dois sentidos	
Velocidade_kmh	Short Integer	Velocidade de circulação no arco em km/h	
Shape_Lenght	Double	Comprimento do arco em metros	Atributo automático
Tempo_min	Short Integer	Tempo de circulação no arco em minutos	

A Figura 5.5 apresenta os atributos de um segmento de linha que representa um troço de estrada regional.

O segmento de estrada regional foi digitalizado de *a* para *b*. Os campos F_ELEV e T_ELEV descritos na tabela representam os atributos de elevação. O F_ELEV (em *a*), com classificação 0, indica que a estrada está à superfície. O T_ELEV (em *b*), com classificação -1, indica que a via vai entrar em túnel.

Em *a*, uma estrada local passa em viaduto passa por cima da estrada regional, isto é, não existe conectividade entre as duas vias. Então a classificação daquela extremidade da estrada local é 1. Em *b*, a estrada regional entra em túnel e por cima passa uma estrada local não existindo conectividade entre as duas vias. A classificação daquela extremidade da via local é 0.

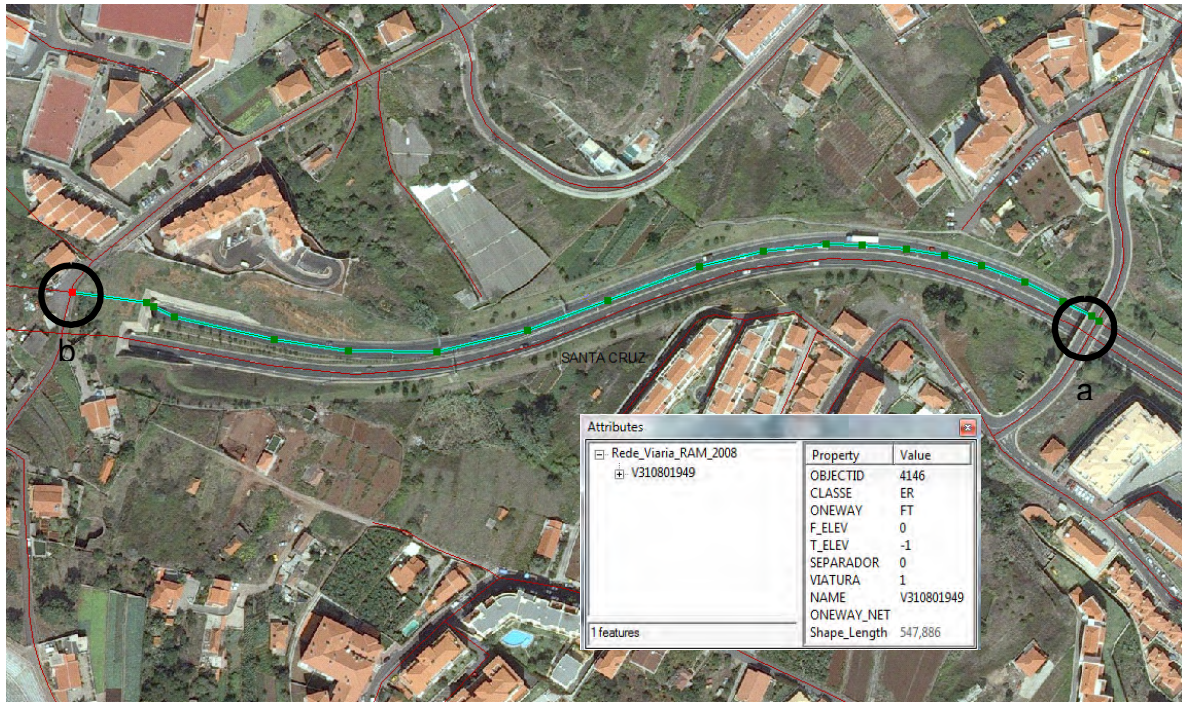


Figura 5.5 – Especificidades da rede viária para construção da *Network Dataset*

A base de dados da rede viária caracteriza igualmente o sentido de circulação do troço: ONEWAY. Este troço em particular tem apenas um sentido, o sentido de digitalização do troço, isto é, a circulação faz-se de a para b. Quando o troço tem dois sentidos o ONEWAY está classificado em branco (“ ”).

Além disso, dada a importância de segregar vias restritas à circulação de viaturas de grande capacidade classificou-se a dimensão dos troços de rede com o atributo VIATURA: utilizou-se o número 1 para identificar vias sem restrições de circulação (viaturas grandes) e o número 2 para identificar vias limitadas à circulação de viaturas pequenas.

Actualizada a rede viária são conhecidos os comprimentos de todos os troços (*Shape_Length*), estando reunidas todas as condições para lhes associar uma velocidade e calcular o tempo de circulação por troço.

5.4.2 VELOCIDADE

Na operação de recolha de resíduos distinguem-se duas velocidades:

- Velocidade em transporte – no trajecto desde o último ponto de recolha, quando o veículo atingiu a sua capacidade máxima ou terminou o circuito, até ao local de descarga e regresso ao primeiro ponto de recolha da segunda volta, quando existe; geralmente, também a velocidade da viatura desde o parque de viaturas até ao primeiro ponto de recolha é superior à velocidade em recolha;

- Velocidade em recolha – no trajecto que a viatura demora a encher, desde o primeiro ponto de recolha até ao último.

Regra geral, na construção da rede, a velocidade é atribuída de acordo com as características das vias e com objectivos de circular em transporte. No entanto, quando se trata da recolha de resíduos, a velocidade é consideravelmente diferente.

É também uma particularidade dos circuitos de recolha de resíduos a descarga da viatura numa instalação própria (aterro, estação de transferência ou outra) antes do regresso ao parque de viaturas. Também esta particularidade não pode ser representada no *Network Analyst*. Para o *software* o final do circuito é o local de descarga da viatura.

Assim, a velocidade usada no *software* foi uma velocidade média, isto é, uma média entre velocidades em transporte e velocidades em recolha.

Saliente-se que este indicador foi aferido com base nos elementos retirados dos actuais circuitos de recolha de resíduos, designadamente, tempos e distâncias gastos por circuito desde o ponto de origem do circuito até à estação de transferência – média das velocidades calculadas para cada um dos concelhos (ilustrado no Quadro 5.3 com o concelho de Santa Cruz).

A velocidade média aplicada aos circuitos efectuados com viaturas grandes, veículos de maior capacidade (20m^3), foi inferior à velocidade média aplicada aos circuitos efectuados com viaturas pequenas, de menor capacidade (5m^3):

- Velocidade média para circuitos de viaturas com capacidade igual a 20m^3 : 10km/h
- Velocidade média para circuitos de viaturas com capacidade igual a 5m^3 : 11km/h

Para determinar o percurso final dos circuitos calculados pelo *Network Analyst*, desde a estação de transferência até ao parque de viaturas, foram usados os seguintes indicadores:

- Velocidade média para circuitos de viaturas com capacidade igual a 20m^3 : 26km/h
- Velocidade média para circuitos de viaturas com capacidade igual a 5m^3 : 30km/h

5.4.3 VALIDAÇÃO DA REDE VIÁRIA

A correcção topológica da rede viária foi realizada com recurso ao *ArcEditor*. O *ArcEditor* inclui ferramentas de edição avançada que permitem a modelação, de um modo mais preciso, das relações geométricas existentes entre as entidades geográficas.

A construção de regras topológicas é geralmente uma operação simples, usualmente efectuada após a digitalização da informação. A topologia é o ramo da geometria que define as relações espaciais aplicáveis à informação geográfica de modo a estabelecer a conectividade e a ligação entre os elementos espaciais; estabelece a ligação espacial entre os elementos através do reconhecimento de nós no fim de cada linha digitalizada.

A aplicação de regras topológicas à informação geográfica implica que os elementos do tipo ponto, linha e polígono tenham relações do tipo: o que está ligado, o que é adjacente, o que está sobreposto, o que está contido.

5.4.4 CONSTRUÇÃO DA NETWORK DATASET

A existência de estradas de largura reduzida, nas quais não é possível a circulação de viaturas grandes, implicou a classificação da rede viária em vias de circulação restrita a viaturas grandes e vias de circulação de viaturas pequenas. Este aspecto determinou a construção de duas redes distintas:

- *Network dataset* para circuitos efectuados com viatura grande
- *Network dataset* para circuitos efectuados com viatura pequena

Preparada a base de dados da rede viária, as *Network Datasets* foram construídas a partir do *ArcCatalog*. Utilizou-se uma política de conectividade em extremidades e os atributos de elevação de modo a representar os diferentes níveis da rede viária (túneis de intersecção a diferentes níveis).

Na construção das *Network Datasets* foram ainda tidas em conta as características da rede viária, designadamente o sentido das vias, as restrições de viragem e nas vias com elevada inclinação assumiu-se sentido único com circulação no sentido descendente.

5.5 PREPARAÇÃO DOS PONTOS DE RECOLHA (*NETWORK LOCATIONS*)

Na aplicação do *Network Analyst* a serviços de recolha de resíduos as *Network Locations* são os pontos de recolha de resíduos (*orders*), os parques de saída das viaturas e as instalações de descarga de resíduos (*depots*).

5.5.1 PONTOS DE RECOLHA (*ORDERS*)

As *orders* correspondem aos locais geográficos onde estão colocados um ou mais contentores para deposição de resíduos pelos cidadãos – pontos de recolha. Um ponto de recolha é uma entidade com atributos geográficos definidos que pode incluir um ou mais contentores independentemente da capacidade. Tal como a rede viária, também já existia uma base de dados com os pontos de recolha (*Feature Class*) embora com necessidade de actualização.

Os atributos usados para caracterizar os locais geográficos onde estão colocados um ou mais contentores apresentam-se na Figura 5.6 e Quadro 5.5.

OBJECTID	Shape	Concelho	Circuito actual	Cod Prod	L 1100	L 800	L 770	L 360	L 240	L 120	L 110	L 80
1	Point	Calheta	CA04VP1D	P310100393	0	0	0	0	0	0	5	0
2	Point	Calheta	CA04VP1D	P310100394	0	0	0	0	0	0	3	0
3	Point	Calheta	CA04VP1D	P310100395	0	0	0	0	0	0	1	0
4	Point	Calheta	CA05VP1D	P310100396	0	0	0	0	0	0	4	0
5	Point	Calheta	CA03VP1D	P310100397	0	0	0	0	0	0	5	0
6	Point	Calheta	CA03VP1D	P310100398	0	0	0	0	0	0	5	0
7	Point	Calheta	CA05VP1D	P310100399	0	0	0	0	0	0	1	0
8	Point	Calheta	CA04VP1D	P310100400	0	0	0	0	0	0	5	0
9	Point	Calheta	CA04VP1D	P310100401	0	0	0	0	0	0	3	0
10	Point	Calheta	CA04VP1D	P310100402	0	0	0	0	0	0	4	0
11	Point	Calheta	CA04VP1D	P310100403	0	0	0	0	0	0	4	0
12	Point	Calheta	CA07VP1D	P310100404	0	0	0	0	0	0	8	0
13	Point	Calheta	CA07VP1D	P310100405	0	0	0	0	0	0	2	0
14	Point	Calheta	CA07VP1D	P310100406	0	0	0	0	0	0	2	0
15	Point	Calheta	CA07VP1D	P310100407	0	0	0	0	0	0	4	0
16	Point	Calheta	CA07VP1D	P310100408	0	0	0	0	0	0	2	0
17	Point	Calheta	CA07VP1D	P310100409	0	0	0	0	0	0	3	0
18	Point	Calheta	CA05VP1D	P310100410	0	0	0	0	0	0	1	0
19	Point	Calheta	CA05VP1D	P310100411	0	0	0	0	0	0	4	0

Figura 5.6 – Atributos dos pontos de recolha de resíduos indiferenciados

Quadro 5.5 – Atributos dos pontos de recolha de resíduos indiferenciados

Atributo	Propriedades	Descrição	Observações
OBJECTID	Object ID	Identificador único sequencial e dinâmico	Atributo automático
Shape	Geometry	Entidades do tipo ponto	Atributo automático
NAME	Text	Identificador que resulta da concatenação da letra “P”, do código do concelho do INE composto por 4 dígitos (DDCC), e um código de 5 algarismos.	
L_1100	Short Integer	Número de contentores de 1100 litros na localização	
L_800	Short Integer	Número de contentores de 800 litros na localização	
L_770	Short Integer	Número de contentores de 770 litros na localização	
L_360	Short Integer	Número de contentores de 360 litros na localização	
L_240	Short Integer	Número de contentores de 240 litros na localização	
L_120	Short Integer	Número de contentores de 120 litros na localização	
L_110	Short Integer	Número de contentores de 110 litros na localização	
L_80	Short Integer	Número de contentores de 80 litros na localização	
Visitas_semanais	Short Integer	Frequência de recolha dos contentores na localização	
Quant_Rec_kg	Short Integer	Quantidade de resíduos a alocar em kg por visita	

5.5.1.1 ESPECIFICIDADES DOS PONTOS DE VISITA

A Figura 5.7 apresenta os atributos da base de dados dos pontos de recolha a percorrer pelas viaturas de recolha.

Identificados os locais geográficos onde estão colocados um ou mais contentores e respectiva capacidade, foi necessário atribuir-lhes a quantidade de resíduos a recolher pela viatura.

Conhecida a produção anual da RAM por concelho, foi determinada a produção média semanal por concelho. O estudo dos actuais circuitos, em particular no que diz respeito ao número de recolhas semanais, permitiu aferir o peso que cada um representa na produção média semanal do concelho. Conhecendo estes dados, a produção foi distribuída proporcionalmente por circuito e capacidade instalada por ponto de recolha.

O quantitativo de resíduos a recolher por ponto de recolha (identificado de acordo com o código referido anteriormente) foi estabelecido numa base de dados em formato Excel (.xls).

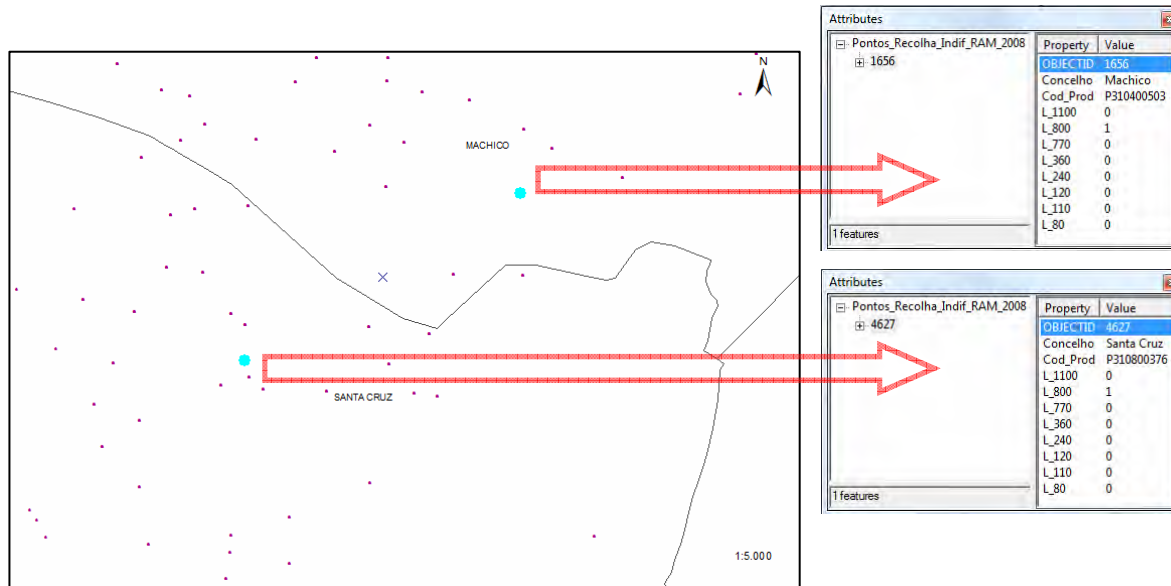


Figura 5.7 – Preparação dos pontos de recolha de resíduos

Concluídas as bases de dados geográfica (*Feature Class*) e alfanumérica (*Excel*) era necessário a ligação das duas. Assim, recorrendo à operação *Join* do *ArcView* foi estabelecida a ligação das bases de dados anteriormente referidas a partir de um campo em comum – o código do ponto de recolha (*NAME*).

A condição de circulação de viaturas exigiu a segregação dos pontos de recolha entre pontos a ser recolhidos por viaturas grandes e pontos a ser recolhidos por viaturas pequenas, levando a que o procedimento de criação de circuitos tenha de ser efectuado para pontos recolhidos por viaturas grandes e pontos recolhidos por viaturas pequenas.

5.5.1.2 INTRODUÇÃO DOS PONTOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS

A Figura 5.8 apresenta as especificações disponíveis aquando o carregamento das *Network Locations* a partir de bases de dados existentes: “*Load Locations*”.

Os pontos de recolha foram introduzidos no *software* a partir de bases de dados já existentes de acordo com as seguintes opções:

- *Name* – foi identificado o nome do ponto de recolha constante na base de dados;
- *CurbApproach* – neste caso, dadas as características da rede viária, vias estreitas, grande declives, não foi definido o lado de aproximação da viatura;
- *ServiceTime* – neste caso particular diz respeito ao tempo de descarga por ponto de recolha;
- *PickupQuantities* – produção a recolher por ponto de recolha; esta propriedade é mapeada, identificando o campo da tabela onde está a quantidade a recolher.

As propriedades *CurbApproach* e *ServiceTime* podem estar perfeitamente definidas na tabela de atributos e, quando aplicável, ser mapeadas na introdução dos pontos de recolha.

Relativamente ao *ServiceTime* a afectar aos pontos de recolha, considerou-se um tempo de serviço nulo por ponto de recolha. Esta consideração derivou por um lado, da existência significativa de contentores de pequena capacidade (240l, 120l e 110l) e por outro, do facto de o *software* considerar uma velocidade média (que inclui transporte e recolha); considerar um tempo de serviço por ponto de recolha limita ainda mais o número de pontos visitados por ponto de recolha;

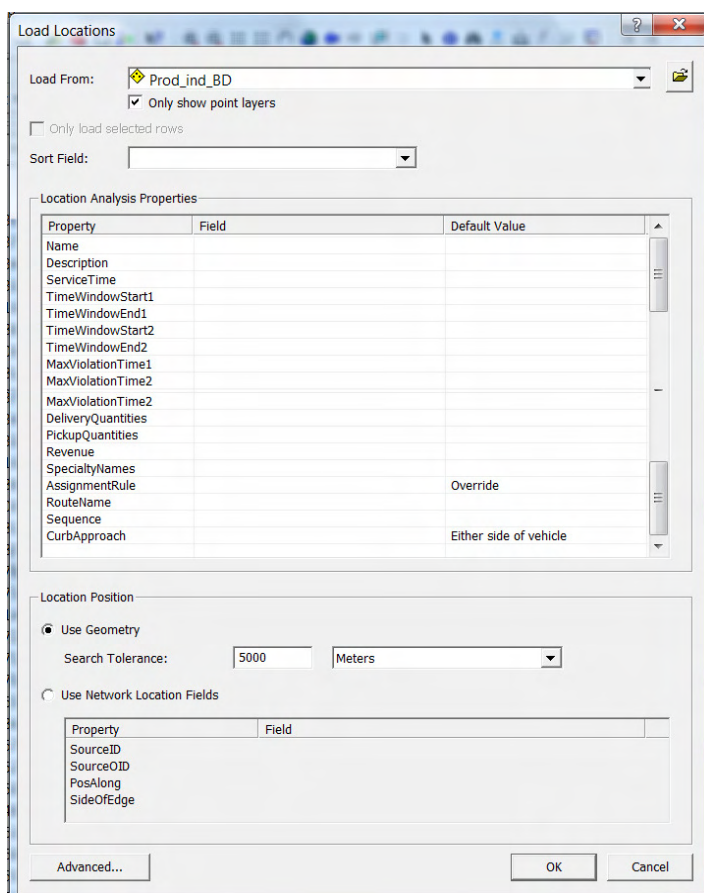


Figura 5.8 – Propriedades de análise das *Network Locations*

5.5.2 LOCAIS DE PARTIDA DOS CIRCUITOS (DEPOTS) E INSTALAÇÕES DE DESCARGA (DEPOTS, ROUTE RENEWALS)

Os depósitos dizem respeito aos locais de partida e chegada dos circuitos. Os locais de partida dos circuitos são os parques de viaturas. Neste caso particular estão em causa dez parques de viaturas, um por cada município. Os locais de chegada dos circuitos são as estações de transferência, designadamente ETZL, ETZO e CPRS.

As estações de transferência poderão também funcionar como ponto de visita intermédio do circuito (*route renewal*) numa situação em que a viatura atinge a capacidade de carga.

Os atributos identificados para caracterização destes elementos apresentam-se no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Atributos dos locais de partida e chegada

Atributo	Propriedades	Descrição	Observações
OBJECTID	Object ID	Identificador único sequencial e dinâmico	Atributo automático
Shape	Geometry	Entidades do tipo ponto	Atributo automático
NAME	Text	Nome do elemento	

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 MATRIZ DE CUSTOS OD (*OD Cost Matrix*) EM PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE PARQUES DE VIATURAS E INSTALAÇÕES DE GESTÃO DE RESÍDUOS

Um aspecto considerado essencial num estudo desta natureza é o conhecimento das distâncias de cada município às estações de transferência, bem como à estação de tratamento. Com o apoio da aplicação *OD Cost Matrix* do *Network Analyst* foi determinada a matriz de distâncias (km) entre cada parque de viaturas de cada município e as estações de transferência/tratamento por rede viária apresentada na Figura 6.1 e Figura 6.2 e Quadro 6.1.

A Figura 6.1 apresenta o resultado gráfico da solução *OD Cost Matrix*, um conjunto de linhas que ligam cada origem a cada destino. A informação alfanumérica é devolvida sob a forma de tabela de acordo com a Figura 6.2.

O Quadro 6.1 apresenta a relação das distâncias origens-destinos sob a forma de tabela *Excel*.

Esta abordagem permitiu identificar:

- As distâncias a percorrer pelas viaturas de recolha dos diferentes concelhos da zona oeste até à Estação de Transferência da Zona Oeste, constatando-se que um deles percorre distâncias da ordem de 40km.
- As distâncias a percorrer pelas viaturas de recolha dos municípios da zona leste até à Estação de Transferência da Zona Leste, verificando-se que num dos concelhos estão em causa distâncias de 30km.

Numa óptica de optimização de meios, equipamentos e recursos humanos, e minimização de custos, conhecesse que quando os locais de descarga de resíduos estão a distâncias superiores a 25-30km a operação de transferência é a solução técnica e economicamente mais viável (Martinho; Gonçalves, 2000).

Neste âmbito, e em relação ao actual modelo de gestão, poder-se-á levantar as seguintes questões:

1. Relativamente ao concelho de Porto Moniz, seria económica e tecnicamente viável a operação de transferência em área afecta ao próprio município com entrega directa na estação de tratamento?
2. Relativamente ao concelho de Santana, qual a vantagem de entregar os resíduos na estação de transferência para posterior entrega na estação de tratamento quando a estação de tratamento está geograficamente mais próxima?

De facto conhecer a relação espacial entre pontos de partida dos circuitos e locais de descarga de resíduos permite imediatamente levantar questões pertinentes sobre as operações de gestão, constituindo uma vantagem no sentido de apoiar/fundamentar decisões.

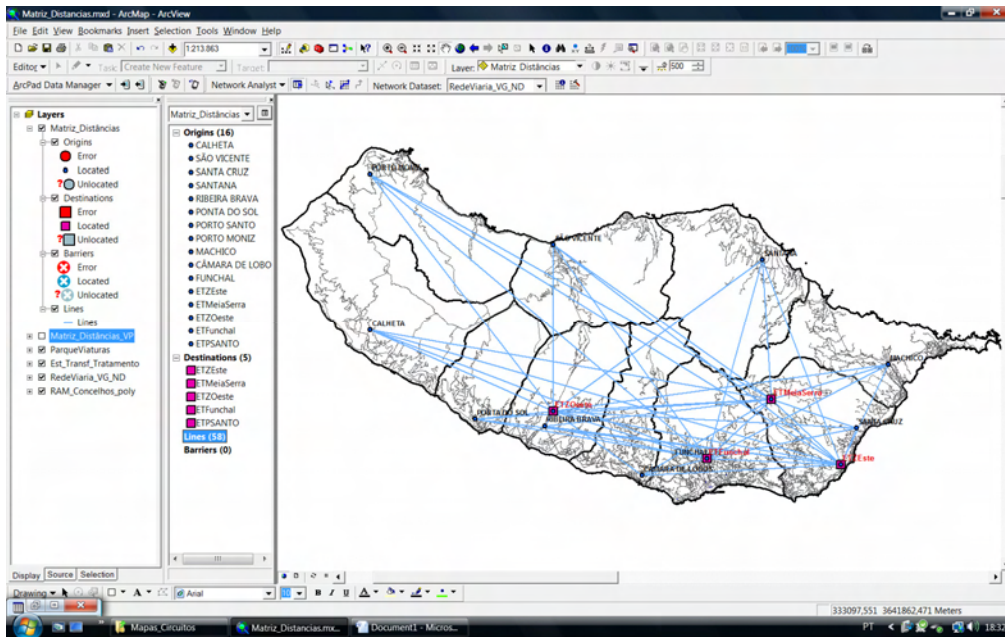


Figura 6.1 – Resultado gráfico da solução OD Cost Matrix

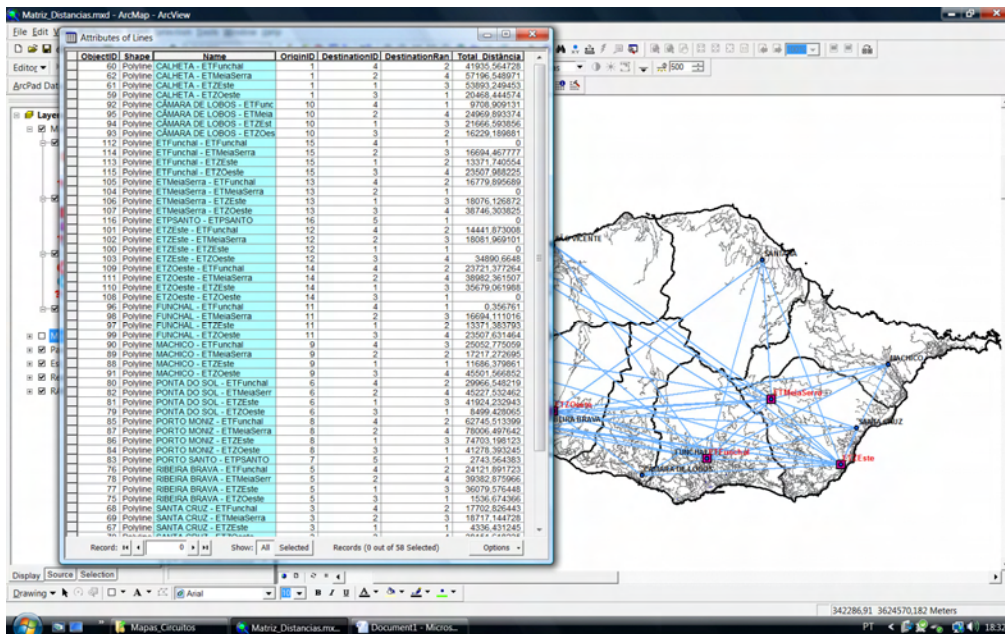


Figura 6.2 – Resultado alfa-numérico da solução OD Cost Matrix

**Quadro 6.1– Matriz de distâncias
parques de viaturas – estações de transferência/tratamento**

De	ETZO	ETZL	ETMS	ETF	CPRS
Parque de viaturas da Calheta	21	54	57	42	—
Parque de viaturas de Porto Moniz	41	75	78	63	—
Parque de viaturas de São Vicente	16	51	54	39	—
Parque de viaturas de Ponta do Sol	8	42	45	30	—
Parque de viaturas de Ribeira Brava	2	36	39	24	—
Parque de viaturas de Santa Cruz	38	4	19	18	—
Parque de viaturas de Santana	50	30	25	34	—
Parque de viaturas de Machico	46	12	17	25	—
Parque de viaturas de Câmara de Lobos	16	22	25	10	—
Parque de viaturas do Funchal	23	13	17	—	—
Parque de viaturas de Porto Santo	—	—	—	—	3
Estação de Transferência da Zona Este	35	—	18	14	—
Estação de Transferência da Zona Oeste	—	36	39	24	—
Estação de Transferência do Funchal	24	13	17	—	—

6.2 ÁREAS DE INFLUÊNCIA (*SERVICE AREA*) EM PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES DE GESTÃO DE RESÍDUOS

Outro aspecto considerado fundamental no sentido de apoiar decisões consistiu em relacionar não só a localização geográfica das Estações de Transferência (ETZL e ETZO) em relação aos municípios mas também em relação ao local de tratamento (ETMS).

Recorrendo ao *Service Area* do *Network Analyst*, e utilizando como base a rede viária actualizada, foram analisadas as áreas de influência das estações de transferência e de tratamento (ETZL, ETZO e ETMS), apresentadas na Figura 6.3 e Figura 6.4.

Da Figura 6.3 salienta-se:

- A área territorial dos concelhos de Machico e Santa Cruz está a menos de 25km da ETZL
- A área do concelho de Santana está, na generalidade, a uma distância superior a 25km da ETZL
- A área territorial de Câmara de Lobos, Ribeira Brava, Ponta do Sol, parte da Calheta e a zona mais central de São Vicente estão a menos de 25km da ETZO
- O concelho de Porto Moniz, a zona norte do concelho da Calheta e a zona este do concelho de São Vicente estão a uma distância superior a 25km da ETZO

Da Figura 6.4 salienta-se:

- As áreas dos concelhos de Machico, Santa Cruz e zona mais urbana de Câmara de Lobos estão a menos de 25km da ETMS
- A zona este do concelho de Santana está a mais de 25km da ETMS

- As viaturas dos concelhos de Porto Moniz e Calheta percorrem mais de 50km até à ETMS

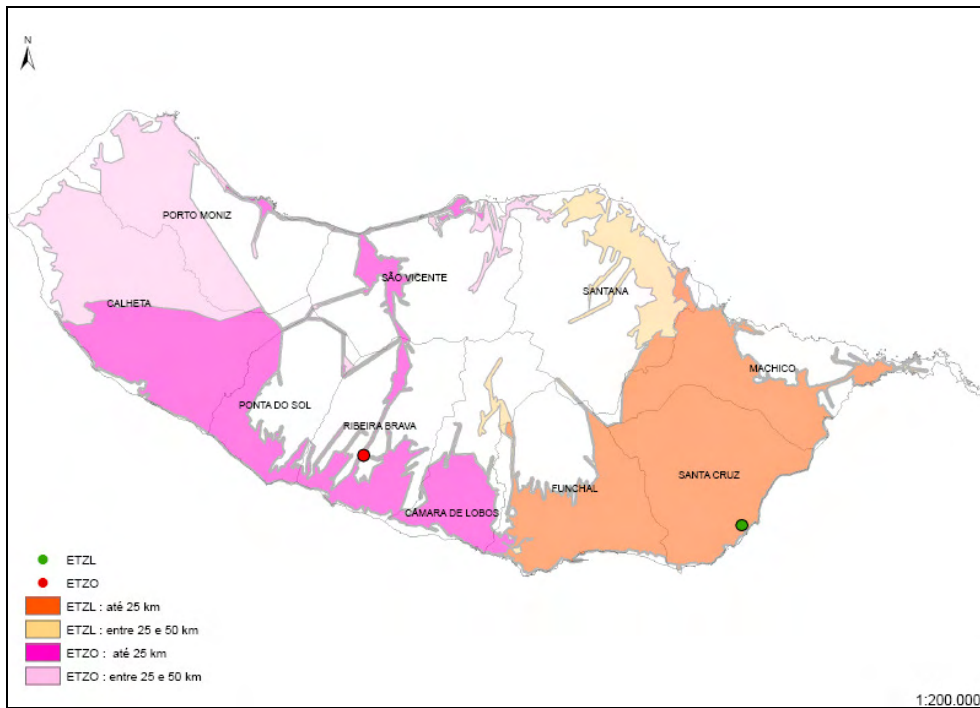


Figura 6.3 – Análise de áreas de influência das estações de transferência

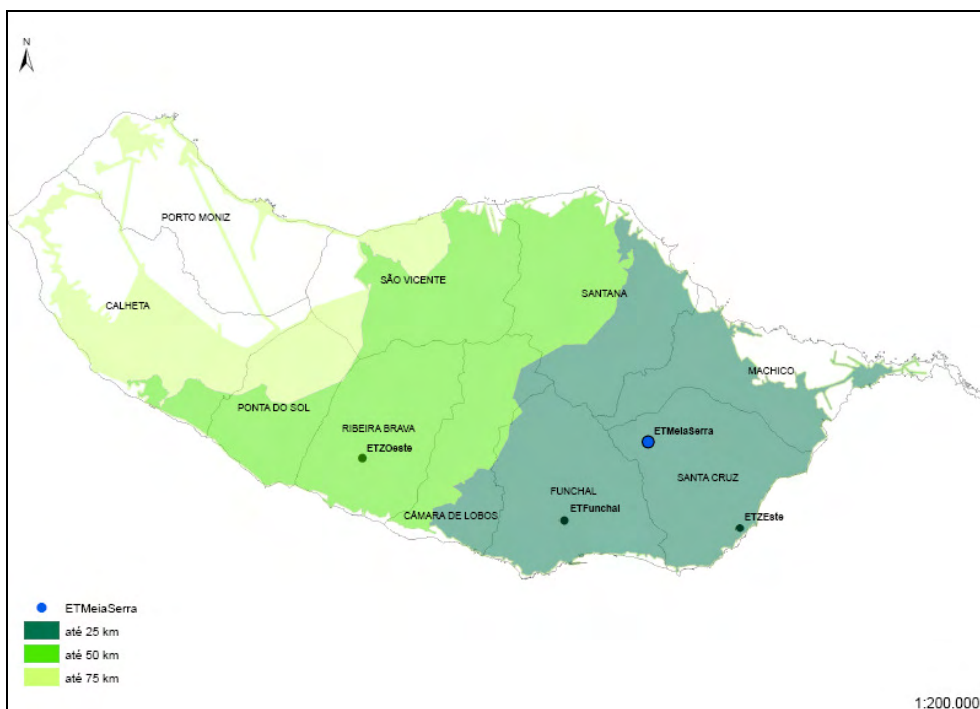


Figura 6.4 – Análise de área de influência da estação de tratamento

Estão em análise instalações em pleno funcionamento, permitindo esta solução apenas justificar ou, no caso de concelhos mais afastados, questionar a entrega dos resíduos nas estações de transferência existentes. Em situações de concelhos próximos da ETMS os resultados permitem equacionar a entrega directa dos resíduos na estação de tratamento.

No entanto, num estudo de localização de unidades de gestão de resíduos, quer sejam estações de transferência, estações de triagem ou estações de tratamento (incineração, aterro, compostagem), a aplicação *Service Area* poderá ser uma ferramenta de extrema importância para apoiar a selecção de um local, preterindo outro.

6.3 PROBLEMA DE PERCURSOS DE VEÍCULOS (*VEHICLE ROUTING PROBLEM*) RELATIVO A RECOLHA DE RESÍDUOS INDIFERENCIADOS

6.3.1 PRESSUPOSTOS CONSIDERADOS NA APLICAÇÃO DO VRP

Os pontos de recolha de resíduos estão permanentemente disponíveis na via pública, permitindo a deposição dos resíduos em qualquer altura.

As estações de transferência estão abertas apenas durante o dia, constituindo desde logo uma condicionante para a execução dos circuitos de recolha de resíduos, uma vez que há um horário de serviço a respeitar.

No entanto, a operação de recolha é efectuada em regime diurno, coincidindo as descargas com o horário de abertura das instalações de transferência.

Por motivos anteriormente expostos, no estudo apresentado não foram definidas janelas temporárias.

No *software* de cálculo de percursos consideraram-se as seguintes restrições:

- Tempo útil máximo para a execução de um circuito: 6:30 h (390 minutos), descontados em relação ao horário diário de 7 horas: 0,5h para o trajecto de regresso da viatura desde a estação de transferência ao parque de viaturas e tarefas várias como lavagem e abastecimento da viatura;
- Peso máximo de resíduos indiferenciados suportado pela viatura numa volta:
 - . 12 000 kg num circuito efectuado por uma viatura grande
 - . 2 500 kg num circuito efectuado por uma viatura pequena

Como já foi mencionado, os parâmetros operacionais considerados na definição dos circuitos, designadamente velocidades e tempo de descarga no destino final foram apurados com base nos elementos facultados pelos municípios nas fichas de controlo de circuitos de resíduos.

Pressupõe-se a autonomia das viaturas durante todo o circuito, procedendo-se ao seu reabastecimento no final da jornada de trabalho.

A Figura 6.5 apresenta os atributos a introduzir por percurso. Na generalidade, os atributos usados foram:

- *Name* – nome do circuito;
- *StartDepotName* – local onde tem início o circuito (um dos dez parques de viaturas);
- *EndDepotName* – local onde finaliza o circuito (uma das estações de transferência);
- *EndDepotServiceTime* – tempo de descarga dos resíduos na estação de transferência (15 minutos);
- *Capacities* – capacidade da viatura (12 000kg para viaturas grandes e 2 500kg para viaturas pequenas);
- *MaxTotalTime* – tempo total do circuito (390 minutos).

Attribute	Value
ObjectID	2
Name	Circuito 02
Description	<Null>
StartDepotName	SANTA CRUZ
EndDepotName	ETZEste
StartDepotServiceTime	<Null>
EndDepotServiceTime	15
EarliestStartTime	08:00:00
LatestStartTime	10:00:00
Capacities	2500
FixedCost	<Null>
CostPerUnitTime	1
CostPerUnitDistance	<Null>
OvertimeStartTime	<Null>
CostPerUnitOvertime	<Null>
MaxOrderCount	999
MaxTotalTime	390
MaxTotalTravelTime	<Null>
MaxTotalDistance	<Null>
SpecialtyNames	<Null>
AssignmentRule	Include
ViolatedConstraints	<Null>
OrderCount	103
TotalCost	380,110507
RegularTimeCost	380,110507
OvertimeCost	0
DistanceCost	0
TotalTime	380,110507
TotalOrderServiceTime	0
TotalBreakServiceTime	0
TotalTravelTime	335,110507
TotalDistance	61,439248
StartTime	20-03-2009 08:00:00
EndTime	20-03-2009 14:20:07
TotalWaitTime	0
TotalViolationTime	0
RenewalCount	3
TotalRenewalServiceTime	45

Figura 6.5 – Atributos por percurso

O processo de criação de percursos foi iterativo de modo a minimizar as necessidades de recursos, quer de viaturas quer de equipas.

Relembre-se que o trajecto final do circuito de recolha, desde a instalação até ao parque da viatura, não é considerado pelo *Network Analyst*. Isto implica que este trajecto tenha sido adicionado à parte, com base em distâncias, tempos e velocidades aferidas com base na informação facultada pelos municípios.

Antes da execução dos circuitos propriamente ditos foram efectuados alguns testes com a solução *VRP*. Em seguida descrevem-se esses testes.

6.3.2 RESULTADOS PRELIMINARES

6.3.2.1 ENSAIO DOS PARÂMETROS TEMPO E VELOCIDADE

Inicialmente testou-se o comportamento da solução *VRP* face a diferentes velocidades mantendo todos os restantes dados de entrada.

No Modelo B consideraram-se aleatoriamente 165 pontos de recolha de resíduos com igual frequência de recolha do concelho de Santa Cruz. Inicialmente testou-se a solução para uma velocidade de 8km/h e, contrariamente ao que se esperava, aumentando 10 minutos o tempo máximo do circuito, de 430 para 440 minutos, a distância e sequência de visitas do percurso alteraram-se – Figura 6.6, Figura 6.7 e Quadro 6.2, Percurso 1 e Percurso 2.

A variação do tempo máximo dos circuitos fez ajustar o modo como o *VRP* pesquisou a melhor solução.

Fazendo o exercício para uma velocidade de 10km/h constatou-se, como seria de esperar, que as distâncias percorridas foram iguais em ambos os percursos (Percurso 3 e 4) e iguais às distâncias do Percurso 2, Figura 6.7.

Destaca-se uma vez mais o facto de a solução *VRP* resolver o problema de modo a minimizar o tempo. Assim, para uma situação mais restritiva, isto é, velocidade mais baixa e menor tempo máximo do circuito, as hipóteses de pesquisas ficam mais limitadas e a melhor solução encontrada pelo *VRP* é distinta.

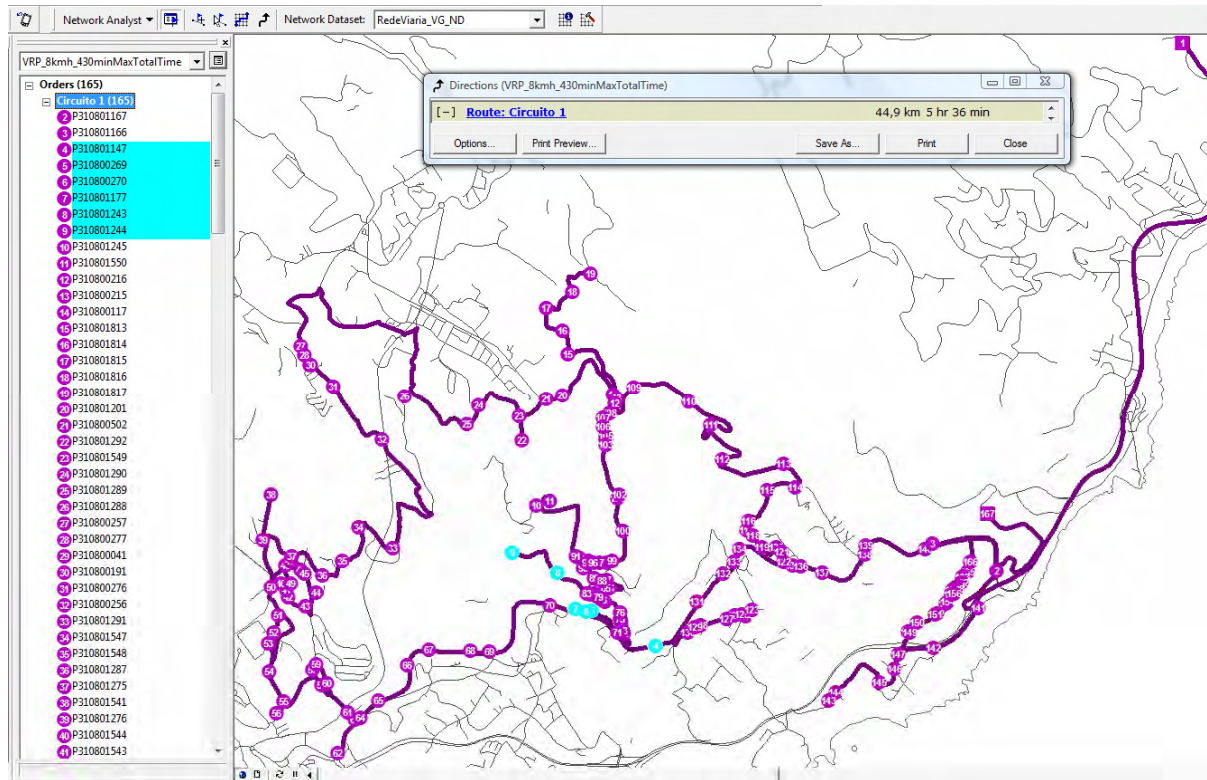


Figura 6.6 – Resultados preliminares: Percurso 1

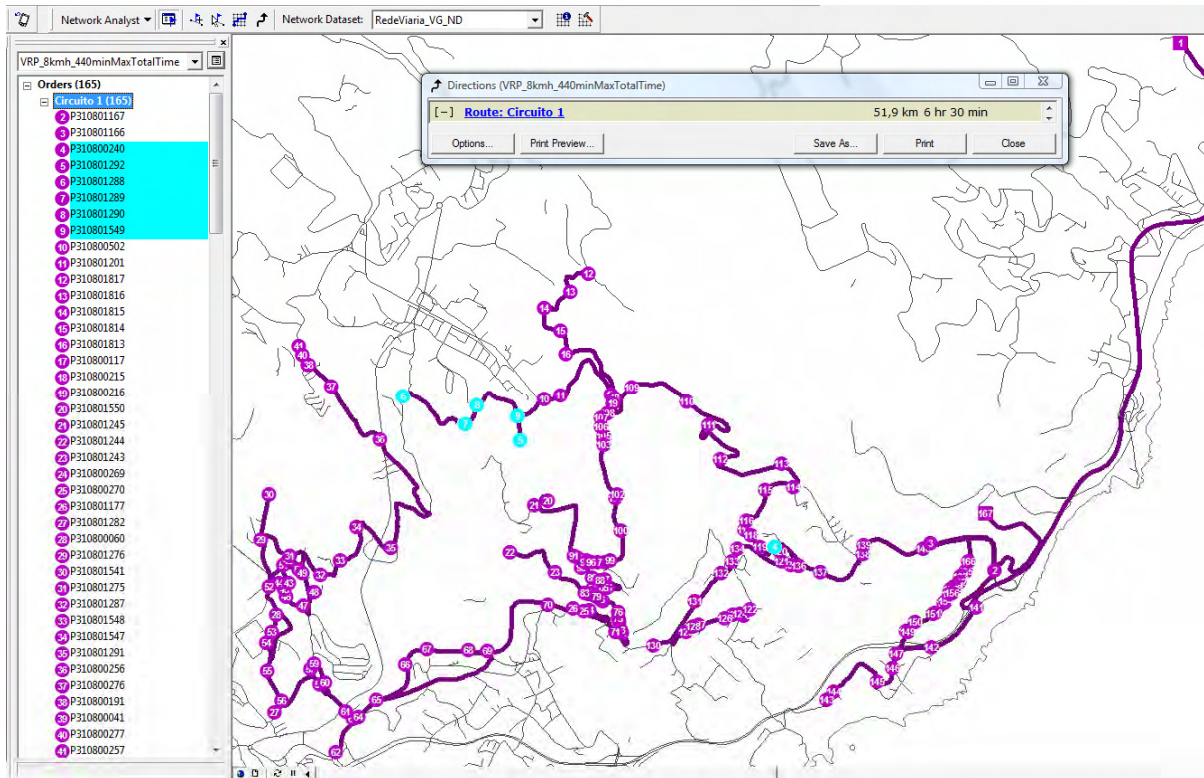


Figura 6.7 – Resultados preliminares: Percurso 2

No Quadro 6.2 apresenta-se uma síntese do ensaio dos parâmetros tempo e velocidade do VRP.

Quadro 6.2 – Síntese de resultados preliminares

	Dados de entrada				Resultados		
	Velocidade (km/h)	Tempo máximo (min)	Capacidade veículo (kg)	Tempo de descarga (min)	Distância (km)	Tempo (min)	Sequência de visitas
Percurso 1 (Figura 6.6)	8	430	12 000	25	44,9	336	P310801167, P310801166, P310801147, P310800269, P310800270, P310801177...
Percurso 2 (Figura 6.7)	8	440	12 000	25	51,9	390	P310801167, P310801166, P310800240, P310801292, P310801288, P310801289...
Percurso 3	10	430	12 000	25	51,9	312	P310801167, P310801166, P310800240, P310801292, P310801288, P310801289...
Percurso 4	10	440	12 000	25	51,9	312	P310801167, P310801166, P310800240, P310801292, P310801288, P310801289...

6.3.2.2 ENSAIO DO MODELO DE APROXIMAÇÃO DA VIATURA AO PONTO DE VISITA

Posteriormente, testou-se o modo como o lado de aproximação da viatura aos contentores de resíduos (*Curbapproach*) altera as variáveis tempo e distância. No exemplo apresentado consideraram-se os mesmos dados da entrada, variando apenas o lado de aproximação da viatura aos pontos de recolha. Seleccionaram-se aleatoriamente 49 pontos de recolha de igual frequência de recolha do concelho de São Vicente.

Quando o lado de aproximação da viatura ao contentor não está definido, Figura 6.8, em particular no que diz respeito ao ponto identificado pela seta a vermelho, a viatura volta imediatamente para trás após recolha, independentemente de nas propriedades da *layer* estar definido que inversões de marcha só ocorrem no final da via.

Apenas quando o lado de aproximação da viatura ao ponto está definido, quer à direita quer à esquerda, é que a viatura respeita a inversão de marcha – Figura 6.9 e Figura 6.10.

De acordo com o Quadro 6.3 constata-se que em situações de não definição da aproximação da viatura ao ponto as distâncias e tempos dos percursos são menores.

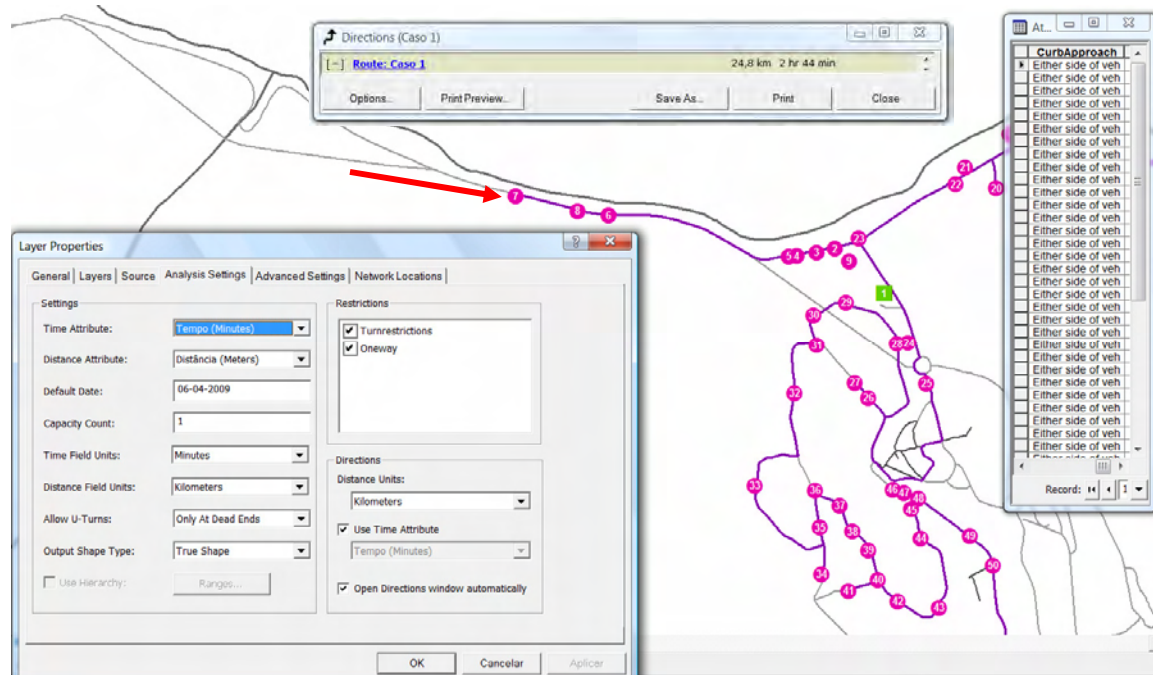


Figura 6.8 – Lado de aproximação da viatura ao ponto de recolha não definido

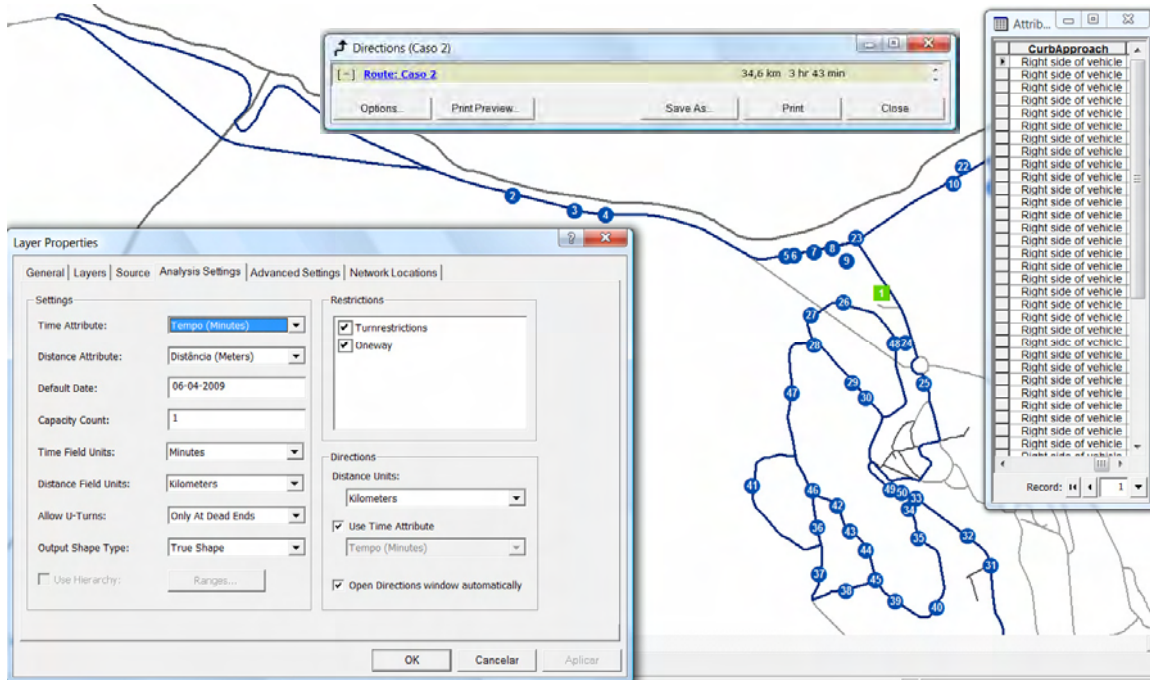


Figura 6.9 – Lado direito de aproximação da viatura ao ponto de recolha

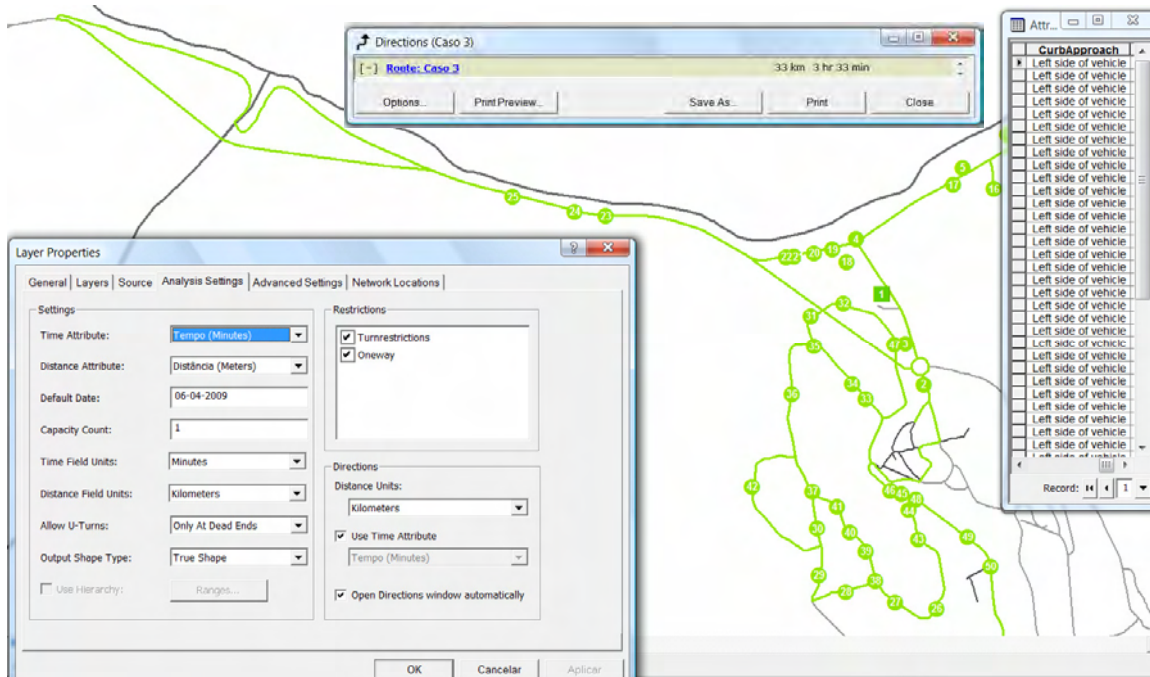


Figura 6.10 – Lado esquerdo de aproximação da viatura ao ponto de recolha

Quadro 6.3 – Comparação da impedância de acordo com a aproximação da viatura

Lado de aproximação da viatura ao ponto a visitar	Distância do percurso (km)	Tempo do percurso (h:min)
Não definido	24,8	2:44
Direito	34,6	3:44
Esquerdo	33,0	3:33

6.3.3 RESULTADOS DE PERCURSOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS (VRP)

Os actuais percursos de recolha de RU indiferenciados estão organizados por município e portanto limitam-se às respectivas áreas de influência.

Recorde-se que um dos objectivos do estudo era o de realizar uma abordagem integrada, isto é, eliminando as restrições devidas às fronteiras dos diferentes municípios.

Para a construção destes novos circuitos modelou-se o *VRP* de forma a identificar os parâmetros que afectam a respectiva solução. Note-se que para cada contentor foi identificada a frequência de recolha, o que permitiu segregar os contentores por frequência semanal de recolha.

Numa primeira fase admitiu-se para o conjunto de contentores a recolher, de igual frequência, um número “excessivo” de viaturas/circuitos de recolha, para depois reduzir o número de viaturas ao mínimo mas de modo a visitar todos os contentores a recolher dentro de um dado horário de serviço – um *VRP* constituído por vários circuitos.

Constatou-se que o resultado desta análise era um conjunto de circuitos que aparecem misturados, isto é, vários circuitos a percorrer a mesma zona.

Numa segunda fase, e tendo em conta a análise efectuada aos resultados anteriores, procedeu-se ao ajuste dos circuitos por aproximação a partir da delimitação de zonas – vários *VRP*, cada um representa um circuito.

Assim, a metodologia seguida na aplicação do *VRP* envolveu as seguintes etapas:

1. Facultar ao *VRP* um número de percursos/viaturas por “excesso”, que incluisse todos os pontos de visita de modo a perceber o comportamento do *software*;
2. Reduzir o número de viaturas até atingir o número de percursos necessários para visitar todos os pontos de recolha;
3. Verificar cada percurso em particular e no conjunto;
4. Ajustar os circuitos de recolha por aproximação, iterativamente, com base nos resultados obtidos anteriormente e no bom senso e conhecimento do utilizador sobre o território em causa.

Em seguida apresentam-se três casos práticos nos quais foi aplicada a metodologia referida.

6.3.3.1 ENSAIO DE PERCURSOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS: CASO 1

O presente caso prático apresenta o cálculo dos percursos de recolha de 542 pontos da Zona Leste da RAM, pontos recolhidos duas vezes por semana com viatura pequena.

A Figura 6.11 apresenta os circuitos obtidos com a aplicação do *VRP* – um *VRP* constituído por vários circuitos.

Genericamente, constatou-se um resultado que mistura os seis circuitos resultantes, isto é, não há uma delimitação geográfica por circuito. Particularmente, verificam-se dois ou mais circuitos a recolher na mesma zona. A zona identificada a sombreado, por exemplo, é percorrida por todos os circuitos excepto pelo circuito cinco.

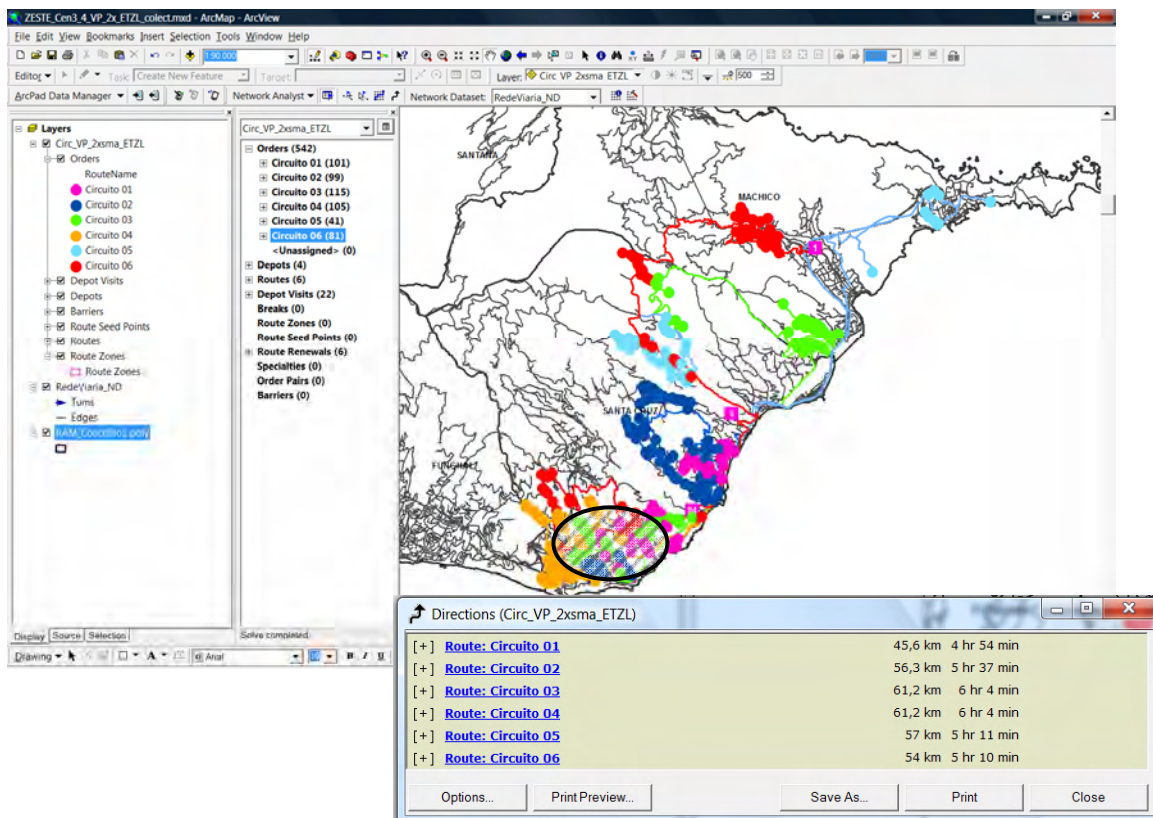


Figura 6.11 – Aplicação de um *VRP* com vários circuitos (Caso 1)

Num serviço de recolha de resíduos, no qual se pretende a delimitação de zonas geográficas preferenciais de recolha, o *software* apresenta um resultado facilmente questionável. Além disso, surgem questões relativas às características do circuito, designadamente no que diz respeito às distâncias e tempos do circuito. Um circuito restrito a uma zona geográfica específica não percorrerá menor distância em menos tempo?

Com o objectivo de responder a esta questão procedeu-se ao ajuste dos circuitos por aproximação, criando um *VRP* por circuito e atribuindo-lhe iterativamente os pontos de recolha. A Figura 6.12 apresenta os resultados obtidos.

Os percursos determinados por processo iterativo são percursos definidos de acordo com zonas geográficas e rede viária, com trajectos mais coerentes face às condicionantes da operação de recolha de resíduos.

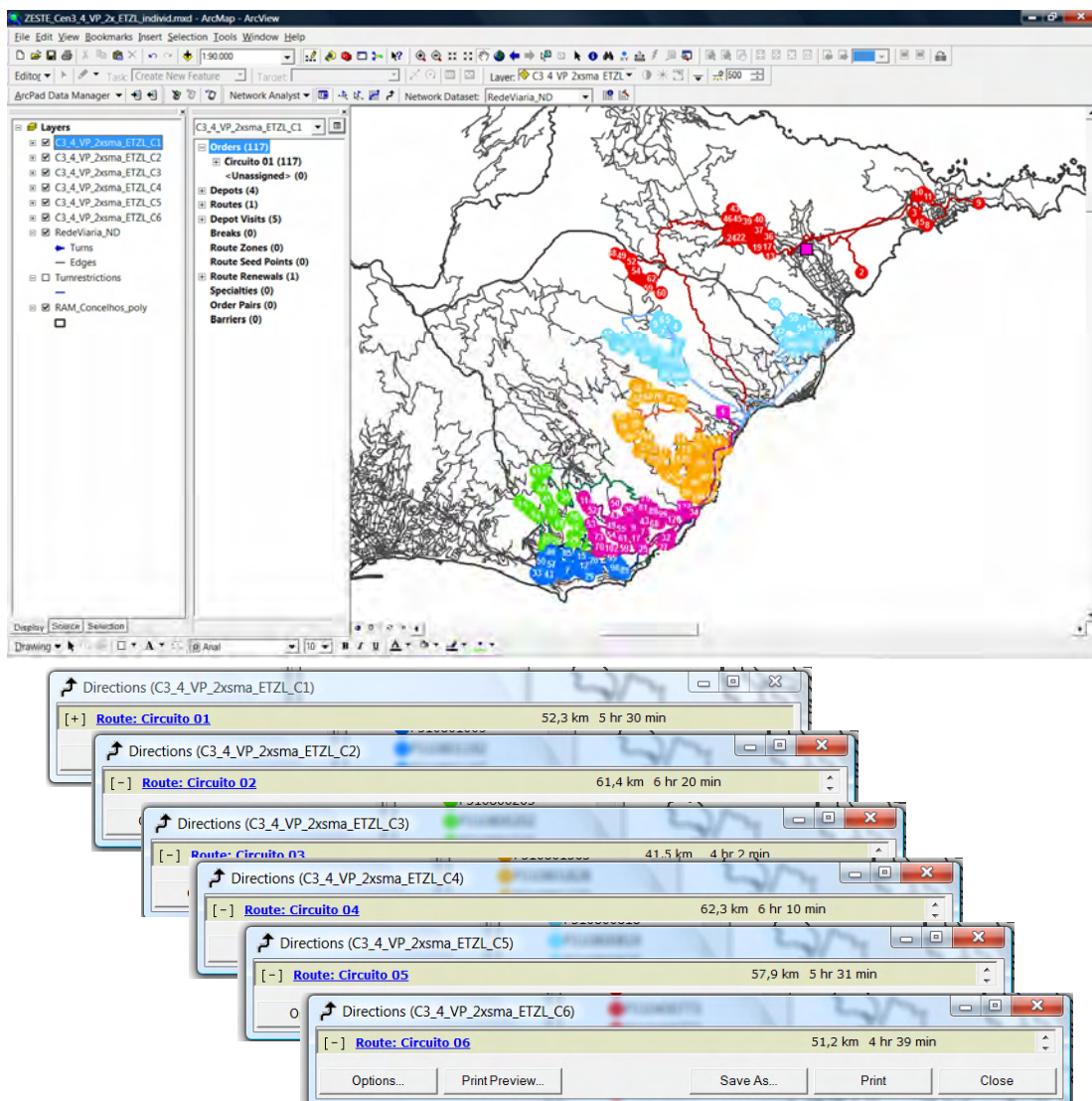


Figura 6.12 – Aplicação de vários VRP, cada um com um circuito (Caso 1)

Os Quadros 6.4 e 6.5 apresentam as características dos circuitos de recolha na totalidade, isto é, desde a saída até à entrada da viatura no parque de viaturas. Salienta-se que ao tempo total do circuito acresce o tempo para as operações de lavagem e abastecimento da viatura de recolha.

Relativamente ao tempo total de execução dos circuitos, verificou-se algum desequilíbrio nos tempos de trabalho. Embora se constataste em ambos os casos, no Quadro 6.5 é mais evidente porque a diferença de tempo de recolha entre o circuito mais rápido e o mais lento é superior a duas horas.

Comparando os dois quadros constatou-se que o ajuste dos circuitos por aproximação reduziu em 8km a distância total nos seis circuitos, o que anualmente resulta em menos 832km percorridos e, conseqüentemente, menores custos de combustível; seguindo o mesmo raciocínio, o tempo total necessário para execução dos circuitos também diminui.

Os circuitos constantes do Quadro 6.5 percorrem menos quilómetros, no entanto, com tempos de trabalho mais desequilibrados.

Quadro 6.4 – Aplicação de um VRP com vários circuitos (Caso 1)

	Origem/Chegada	Local de descarga	PV - Local de descarga				Local de descarga - PV			Total Circuito		Nº pontos recolhidos	Quantidade recolhida kg
			Velocidade km/h	Tempo* h	Distância km	Nº de descarga	Velocidade km/h	Tempo h	Distância km	Tempo h	Distância km		
Circuito 1	PV Santa Cruz	ETZL	11	04:54	46	4	30	00:10	5	05:04	51	101	6237
Circuito 2	PV Santa Cruz	ETZL	11	05:37	56	3	30	00:10	5	05:47	61	99	6284
Circuito 3	PV Santa Cruz	ETZL	11	06:04	61	3	30	00:10	5	06:14	66	115	7338
Circuito 4	PV Santa Cruz	ETZL	11	06:04	61	3	30	00:10	5	06:14	66	105	7349
Circuito 5	PV Santa Cruz	ETZL	11	05:11	57	1	30	00:10	5	05:21	62	41	2073
Circuito 6	PV Machico	ETZL	11	05:10	54	2	30	00:24	12	05:34	66	81	4481
										34:14	372	542	33762

* o tempo inclui 15 min de descarga no final do circuito

Quadro 6.5 – Aplicação de vários VRP, cada um com um circuito (Caso 1)

	Origem/Chegada	Local de descarga	PV - Local de descarga				Local de descarga - PV			Total Circuito		Nº pontos recolhidos	Quantidade recolhida kg
			Velocidade km/h	Tempo* h	Distância km	Nº de descarga	Velocidade km/h	Tempo h	Distância km	Tempo h	Distância km		
Circuito 1	PV Santa Cruz	ETZL	11	05:30	52	4	30	00:10	5	05:40	57	117	9140
Circuito 2	PV Santa Cruz	ETZL	11	06:20	61	4	30	00:10	5	06:30	66	103	7592
Circuito 3	PV Santa Cruz	ETZL	11	04:02	42	2	30	00:10	5	04:12	47	73	4509
Circuito 4	PV Santa Cruz	ETZL	11	06:10	62	3	30	00:10	5	06:20	67	104	5512
Circuito 5	PV Santa Cruz	ETZL	11	05:31	58	2	30	00:10	5	05:41	63	84	4223
Circuito 6	PV Machico	ETZL	11	04:39	51	1	30	00:24	12	05:03	63	61	2787
										33:26	364	542	33762

* o tempo inclui 15 min de descarga no final do circuito

6.3.3.2 ENSAIO DE PERCURSOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS: CASO 2

O caso prático número dois apresenta o cálculo dos percursos de recolha de 833 pontos de recolha indiferenciada da Zona Oeste da RAM, pontos recolhidos três vezes por semana com viatura grande.

Facultando um número “excessivo” de viaturas/circuitos de recolha ao *VRP* e reduzindo-os posteriormente ao número de viaturas mínimo concluiu-se serem necessários 14 circuitos para a recolha de todos os pontos – Figura 6.13. Genericamente, constatou-se um resultado que mistura os circuitos. Particularmente, nas áreas territoriais de Porto Moniz e Calheta, concelhos mais afastados da instalação de entrega dos resíduos, verificam-se dois ou mais circuitos a percorrer as mesmas vias.

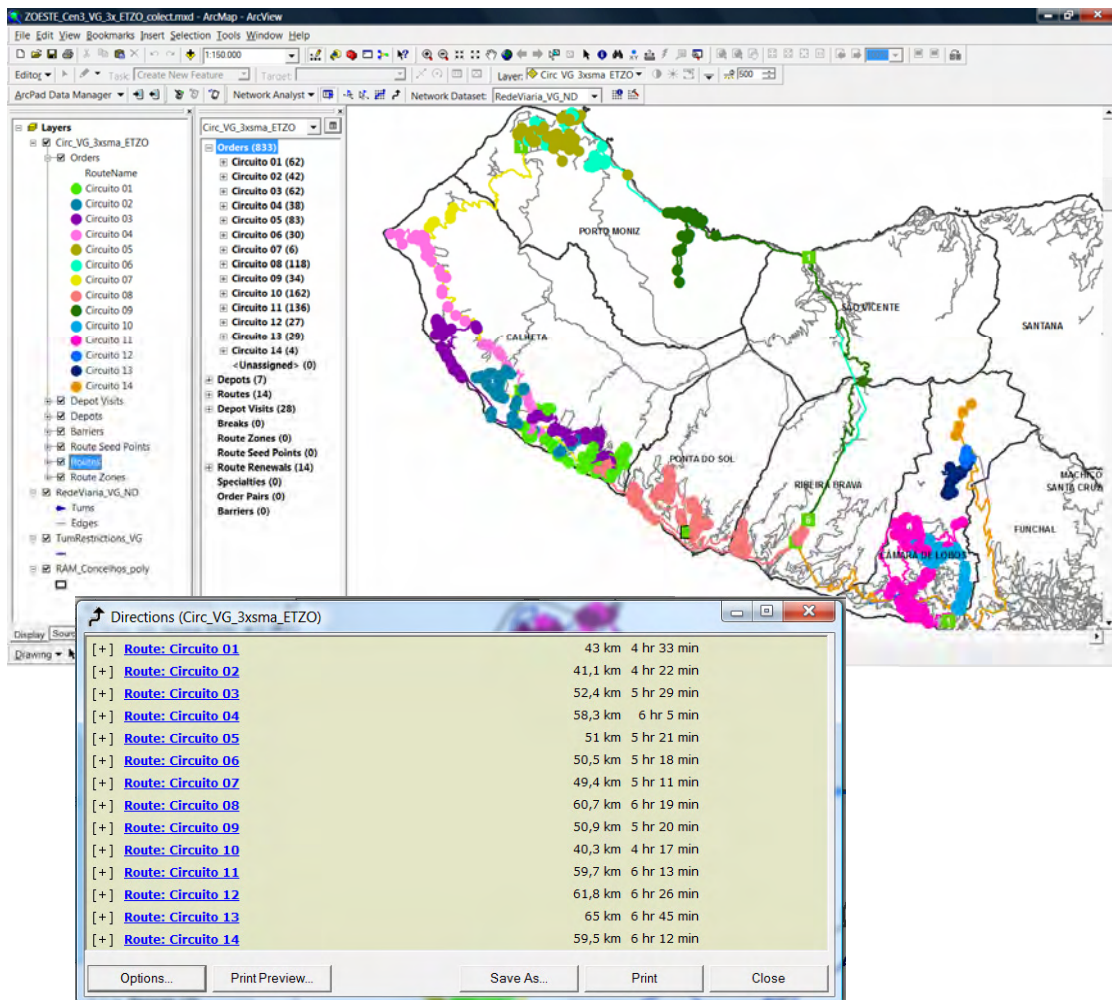


Figura 6.13 – Aplicação de um *VRP* com vários circuitos (Caso 2)

O ajuste manual dos percursos por processo iterativo de acordo com zonas geográficas e rede viária reduziu o número de circuitos de 14 para 12 com trajectos mais coerentes – Figura 6.14.

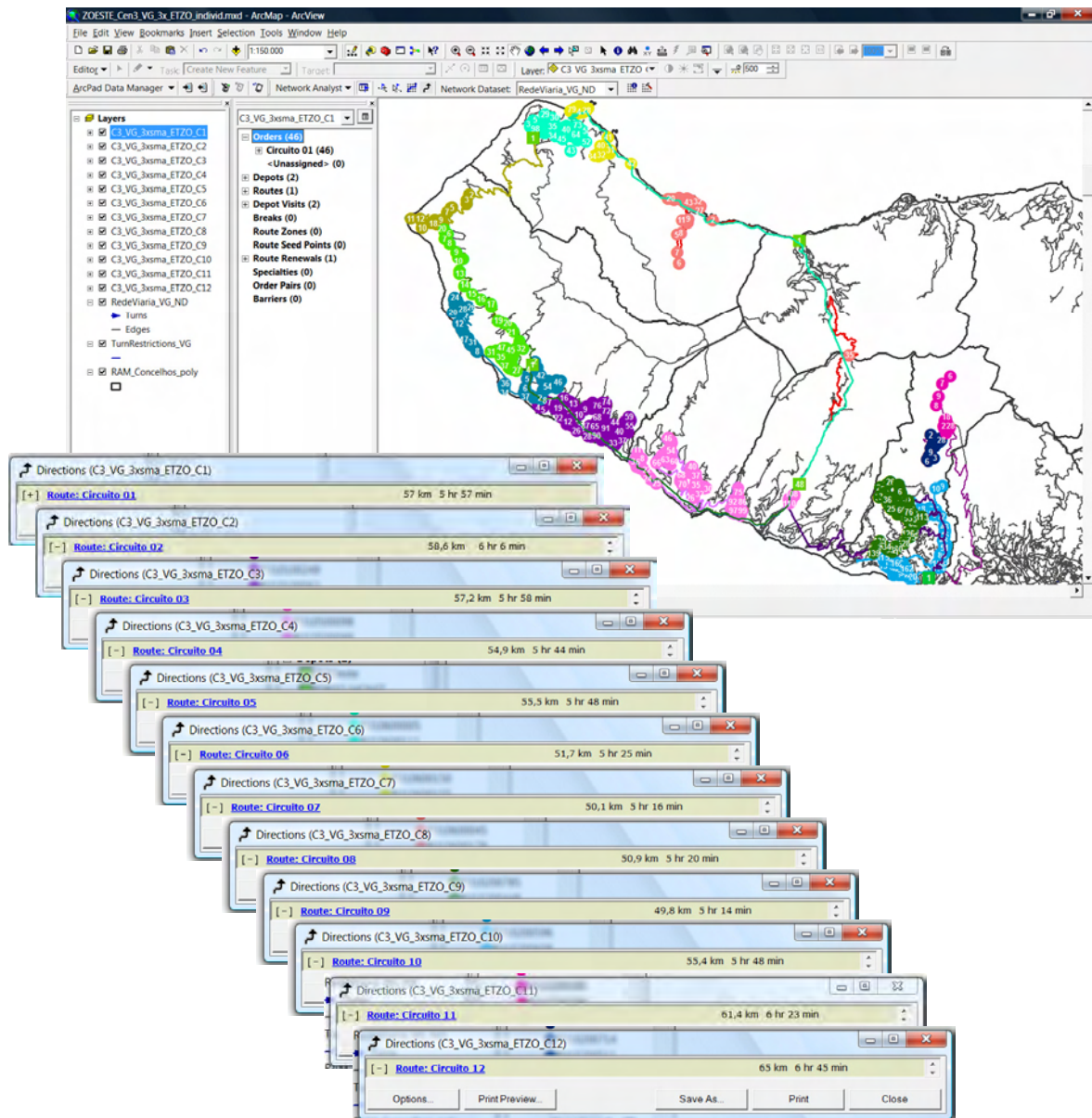


Figura 6.14 – Aplicação de vários *VRP*, cada um com um circuito (Caso 2)

Os Quadro 6.6 e Quadro 6.7 apresentam as características dos circuitos de recolha na totalidade, isto é, desde a saída até à entrada da viatura no parque de viaturas. Salienta-se que ao tempo total do circuito acresce o tempo para as operações de lavagem e abastecimento da viatura de recolha.

Aplicando o *VRP* com vários circuitos verificou-se serem necessários 14 circuitos que percorrem um total de 1049km – Quadro 6.6; ajustando os circuitos por aproximação (um *VRP*, um circuito) constatou-se serem necessários 12 circuitos que percorrem 954km – Quadro 6.7. Comparativamente verifica-se uma economia de 95km que com uma frequência de recolha de 3 vezes por semana resulta em menos 14 820km feitos anualmente, minimizando custos, designadamente custos de combustível.

Quadro 6.6 – Aplicação de um VRP com vários circuitos (Caso 2)

	Origem/Chegada	Local de descarga	PV - Local de descarga				Local de descarga - PV			Total Circuito		Nº pontos recolhidos	Quantidade recolhida kg
			Velocidade km/h	Tempo* h	Distância km	Nº de descargas	Velocidade km/h	Tempo h	Distância km	Tempo h	Distância km		
Circuito 1	PV Calheta	ETZO	10	04:33	43	1	26	00:48	21	05:21	64	62	5345
Circuito 2	PV Calheta	ETZO	10	04:22	41	1	26	00:48	21	05:10	62	42	2767
Circuito 3	PV Calheta	ETZO	10	05:29	52	1	26	00:48	21	06:17	73	62	4659
Circuito 4	PV Calheta	ETZO	10	06:05	58	1	26	00:48	21	06:53	79	38	1982
Circuito 5	PV Porto Moniz	ETZO	10	05:21	51	1	26	01:35	41	06:56	92	83	2277
Circuito 6	PV Porto Moniz	ETZO	10	05:18	51	1	26	01:35	41	06:53	92	30	861
Circuito 7	PV Porto Moniz	ETZO	10	05:11	49	1	26	01:35	41	06:46	90	6	257
Circuito 8	PV Ribeira Brava	ETZO	10	06:19	61	1	26	00:05	2	06:24	63	118	5762
Circuito 9	PV São Vicente	ETZO	10	05:20	51	1	26	00:37	16	05:57	67	34	1470
Circuito 10	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	04:17	40	2	26	00:37	16	04:54	56	162	12864
Circuito 11	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	06:13	60	1	26	00:37	16	06:50	76	136	11238
Circuito 12	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	06:26	62	1	26	00:37	16	07:03	78	27	1419
Circuito 13	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	06:45	65	1	26	00:37	16	07:22	81	29	1663
Circuito 14	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	06:12	60	1	26	00:37	16	06:49	76	4	467
										89:35	1049	833	53031

* o tempo inclui 15 min de descarga no final do circuito

Quadro 6.7 – Aplicação de vários VRP, cada um com um circuito (Caso 2)

	Origem/Chegada	Local de descarga	PV - Local de descarga				Local de descarga - PV			Total Circuito		Nº pontos recolhidos	Quantidade recolhida kg
			Velocidade km/h	Tempo* h	Distância km	Nº de descargas	Velocidade km/h	Tempo h	Distância km	Tempo h	Distância km		
Circuito 1	PV Calheta	ETZO	10	05:57	57	1	26	00:48	21	06:45	78	46	2519
Circuito 2	PV Calheta	ETZO	10	06:06	59	1	26	00:48	21	06:54	80	57	3477
Circuito 3	PV Calheta	ETZO	10	05:58	57	1	26	00:48	21	06:46	78	96	8720
Circuito 4	PV Calheta	ETZO	10	05:44	55	1	26	00:48	21	06:32	76	109	5045
Circuito 5	PV Porto Moniz	ETZO	10	05:48	56	1	26	01:35	41	07:23	97	20	1013
Circuito 6	PV Porto Moniz	ETZO	10	05:25	52	1	26	01:35	41	07:00	93	72	1947
Circuito 7	PV Porto Moniz	ETZO	10	05:16	50	1	26	01:35	41	06:51	91	41	1191
Circuito 8	PV São Vicente	ETZO	10	05:20	51	1	26	00:37	16	05:57	67	34	1470
Circuito 9	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	05:14	50	2	26	00:37	16	05:51	66	138	12391
Circuito 10	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	05:48	55	1	26	00:37	16	06:25	71	161	11724
Circuito 11	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	06:23	61	1	26	00:37	16	07:00	77	32	2263
Circuito 12	PV Câmara de Lobos	ETZO	10	06:45	65	1	26	00:37	16	07:22	81	27	1272
										80:46	954	833	53031

* o tempo inclui 15 min de descarga no final do circuito

Particularidades relativamente ao Quadro 6.6:

- O circuito 14, com partida e chegada a Câmara de Lobos, percorre 76km em 6h49min para recolher 467kg (o correspondente à visita a quatro pontos de recolha) situação que na prática é inaceitável;
- Alguns tempos de trabalho são inferiores a 6 horas; a diferença de tempo de recolha entre o circuito mais rápido (4h:54min) e o circuito mais lento (7h:22min) corresponde a cerca de duas horas e meia;

Particularidades relativamente ao Quadro 6.7:

- Os tempos de trabalho mais rápidos aproximam-se das 6 horas; a diferença de tempo entre o circuito mais rápido (5h:51min) e o circuito mais lento (7h:22min) corresponde a cerca de uma hora e meia;
- O circuito 5, com partida e chegada a Porto Moniz, percorre 97km em mais de 7 horas para recolher 1013kg;

6.3.3.3 ENSAIO DE PERCURSOS DE RECOLHA DE RESÍDUOS: CASO 3

O caso prático número três apresenta o cálculo das percursos de recolha de 345 pontos da Zona Leste da RAM, pontos recolhidos três vezes por semana com viatura pequena.

Aplicando um *VRP* com vários circuitos, concluiu-se serem necessários 4 circuitos para a recolha de todos os pontos – Figura 6.15. Genericamente, constatou-se um resultado que mistura os circuitos.

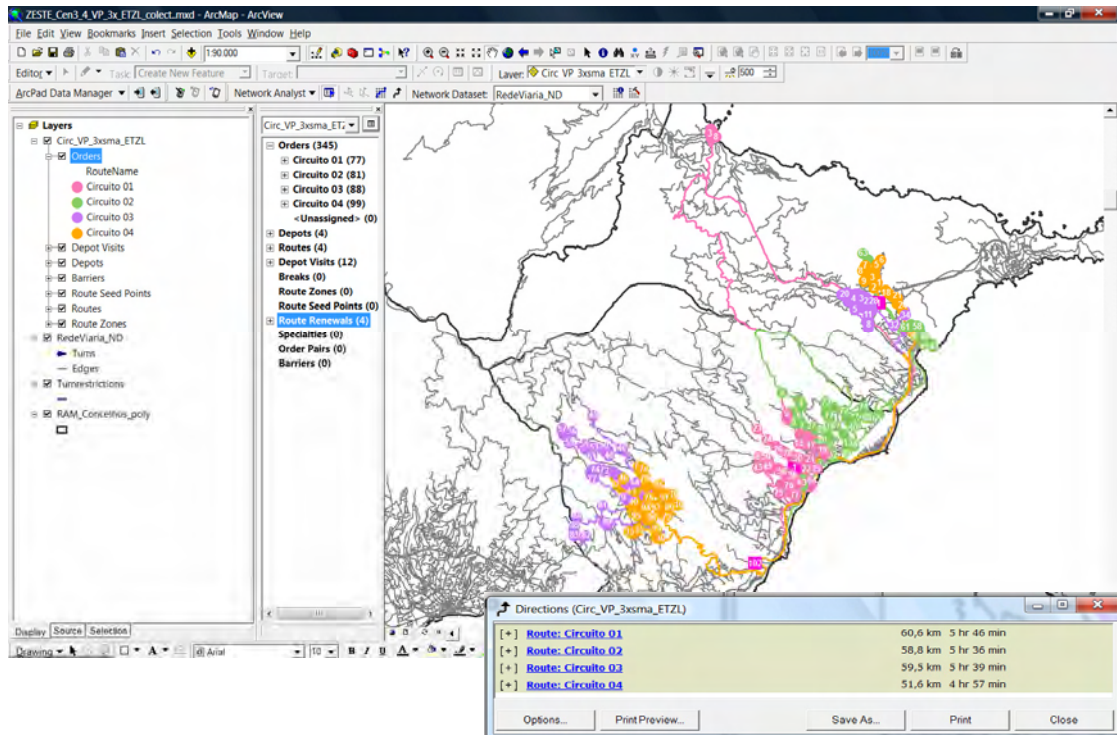


Figura 6.15 – Aplicação de um *VRP* com vários circuitos (Caso 3)

Após ajuste dos percursos por processo iterativo de acordo com zonas geográficas e rede viária obtiveram-se os circuitos definidos na Figura 6.16.

Os Quadro 6.8 e Quadro 6.9 apresentam as características dos circuitos de recolha na totalidade, isto é, desde a saída até à entrada da viatura no parque de viaturas. Salienta-se que ao tempo total do circuito acresce o tempo para as operações de lavagem e abastecimento da viatura de recolha.

Contrariamente aos casos práticos anteriores, o ajuste iterativo dos circuitos resulta numa diferença de mais de 13km, o que anualmente resulta em mais 2 044km percorridos, com os consequentes custos associados.

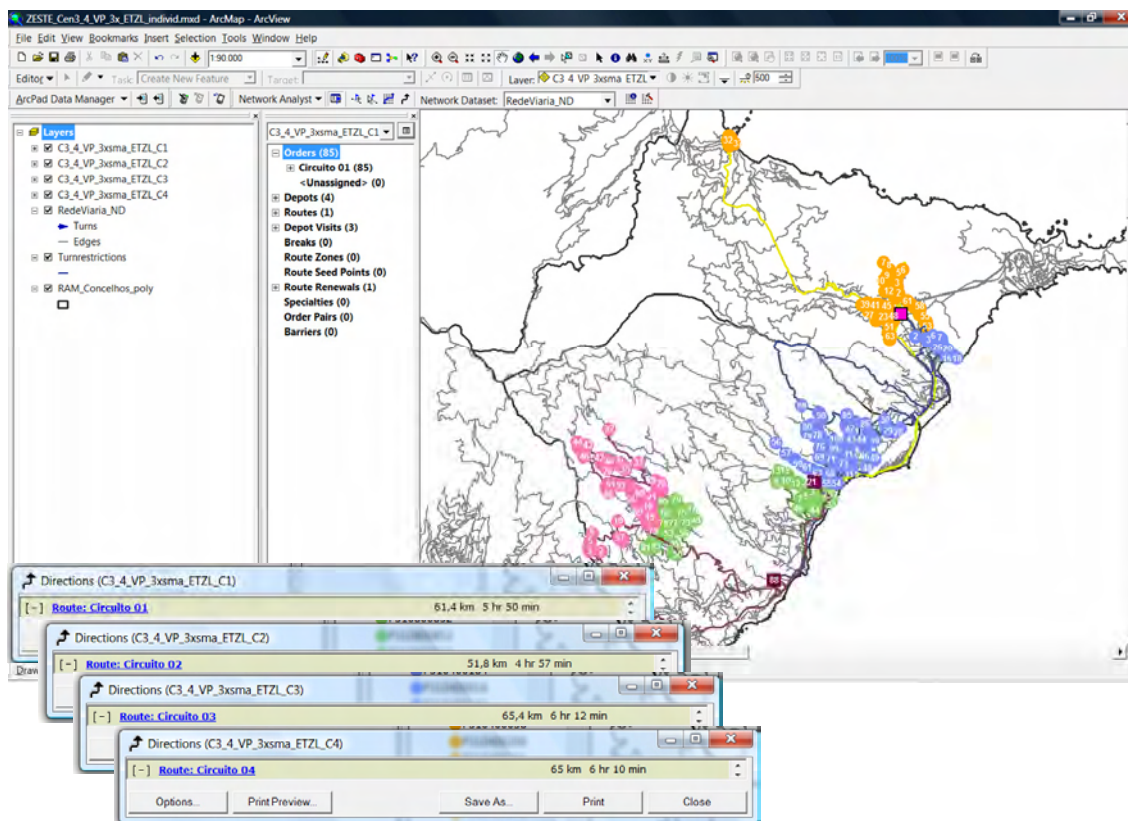


Figura 6.16 – Aplicação de vários VRP, cada um com um circuito (Caso 3)

Quadro 6.8 – Aplicação de um VRP com vários circuitos (Caso 3)

	Origem/Chegada	Local de descarga	PV - Local de descarga				Local de descarga - PV			Total Circuito		Nº pontos recolhidos	Quantidade recolhida kg
			Velocidade km/h	Tempo* h	Distância km	Nº de descarga	Velocidade km/h	Tempo h	Distância km	Tempo h	Distância km		
Circuito 1	PV Santa Cruz	ETZL	11	05:46	61	2	30	00:10	5	05:56	66	77	2631
Circuito 2	PV Santa Cruz	ETZL	11	05:36	59	2	30	00:10	5	05:46	64	81	3646
Circuito 3	PV Machico	ETZL	11	05:39	60	2	30	00:24	12	06:03	72	88	3902
Circuito 4	PV Machico	ETZL	11	04:57	52	2	30	00:24	12	05:21	64	99	4942
										23:06	265	345	15121

* o tempo inclui 15 min de descarga no final do circuito

Quadro 6.9 – Aplicação de vários VRP, cada um com um circuito (Caso 3)

	Origem	Destino	PV - Local de descarga				Local de descarga - PV			Total Circuito		Nº pontos recolhidos	Quantidade recolhida kg
			Velocidade km/h	Tempo* h	Distância km	Nº de ETZL	Velocidade km/h	Tempo h	Distância km	Tempo h	Distância km		
Circuito 1	PV Santa Cruz	ETZL	11	05:50	61	2	30	00:10	5	06:00	66	85	2818
Circuito 2	PV Santa Cruz	ETZL	11	04:57	52	2	30	00:10	5	05:07	57	83	2852
Circuito 3	PV Machico	ETZL	11	06:12	65	2	30	00:24	12	06:36	77	113	5211
Circuito 4	PV Machico	ETZL	11	06:10	65	2	30	00:24	12	06:34	77	64	4240
										24:17	278	345	15121

* o tempo inclui 15 min de descarga no final do circuito

A metodologia descrita nos três casos práticos expostos foi aplicada nos Modelos B e C: segregadamente a circuitos efectuados com viaturas grandes e viaturas pequenas por locais geográficos de deposição de resíduos indiferenciados de igual frequência de recolha.

6.3.4 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO VRP

Em seguida apresentam-se para os Modelos A, B e C o número de circuitos e de viaturas e equipas requeridas para a recolha de resíduos indiferenciados. Os valores relativos a viaturas e equipas não incluem reservas.

Relembre-se que o *Network Analyst* foi usado para traçar os circuitos nos Modelos B e C, sendo o Modelo A, situação actual, o referencial de comparação.

Salienta-se ainda que na situação actual a recolha é municipal e nos Modelos B e C a solução passa por uma recolha integrada, eliminando fronteiras dos diferentes municípios.

Relativamente ao número de circuitos, numa recolha integrada (Modelos B e C) serão necessários menos circuitos de recolha comparativamente com a situação actual (recolha municipal) – Quadro 6.10.

No Modelo A, recolha de âmbito municipal, existem circuitos que duram 4 horas; os circuitos dos Modelos B e C foram dimensionados para 7 horas. Por esta razão, nos Modelos B e C obtiveram-se menos circuitos e mais concentrados.

Quadro 6.10 – Número de circuitos de recolha indiferenciada

		Modelo A	Modelo B	Modelo C
ETZL	Viaturas grandes (20m ³)		17	17
	Viaturas pequenas (5m ³)		15	15
ETZO A	Viaturas grandes (20m ³)		23	
	Viaturas pequenas (5m ³)		27	
ETZO B	Viaturas grandes (20m ³)			17
	Viaturas pequenas (5m ³)			21
Câmara de Lobos	Viaturas grandes (20m ³)			6
	Viaturas pequenas (5m ³)			6
CPRS	Viaturas grandes (20m ³)		2	2
	Viaturas pequenas (5m ³)		2	2
Total	Viaturas grandes (20m³)	50	42	42
	Viaturas pequenas (5m³)	55	44	44
		105	86	86

ETZO A inclui Câmara de Lobos; ETZO B exclui Câmara de Lobos

No que diz respeito ao número de viaturas necessárias, o Modelo B (recolha integrada em três subsistemas) necessita de menos uma viatura comparativamente com a situação actual (recolha municipal) e o Modelo C (recolha integrada em quatro subsistemas) requer o mesmo número de viaturas – Quadro 6.11.

O Quadro 6.12 apresenta as necessidades de pessoal. Para um sistema de recolha integrada organizado em três subsistemas serão necessárias menos 3 equipas comparativamente ao sistema de recolha municipal (situação actual) e sistema de recolha integrada organizado em quatro subsistemas.

Quadro 6.11 – Viaturas de recolha necessárias

		Modelo A	Modelo B	Modelo C
ETZL	Viaturas grandes (20m ³)	_____	8	8
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	7	7
ETZO A	Viaturas grandes (20m ³)	_____	14	_____
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	13	_____
ETZO B	Viaturas grandes (20m ³)	_____	_____	10
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	_____	9
Câmara de Lobos	Viaturas grandes (20m ³)	_____	_____	4
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	_____	5
CPRS	Viaturas grandes (20m ³)	_____	2	2
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	2	2
Total	Viaturas grandes (20m³)	23	24	24
	Viaturas pequenas (5m³)	24	22	23
		47	46	47

ETZO A inclui Câmara de Lobos; ETZO B exclui Câmara de Lobos

Quadro 6.12 – Recursos humanos afectos à recolha

		Modelo A	Modelo B	Modelo C
ETZL	Motoristas	_____	15	15
	Cantoneiros	_____	30	30
ETZO A	Motoristas	_____	26	_____
	Cantoneiros	_____	52	_____
ETZO B	Motoristas	_____	_____	18
	Cantoneiros	_____	_____	36
Câmara de Lobos	Motoristas	_____	_____	9
	Cantoneiros	_____	_____	18
CPRS	Motoristas	_____	4	4
	Cantoneiros	_____	8	8
Total	Motoristas	46	45	46
	Cantoneiros	92	90	92
		138	135	138

ETZO A inclui Câmara de Lobos; ETZO B exclui Câmara de Lobos

Actualmente os custos com pessoal afecto ao sistema de recolha de resíduos da RAM, de âmbito municipal, rondam os 2,5 milhões de euros – este valor inclui o sistema de recolha na globalidade, recolha indiferenciada e selectiva.

Considerando a totalidade do sistema de recolha para os Modelos B e C, recolha indiferenciada e selectiva, os custos de pessoal serão da ordem de 1,95 e 2,0 milhões de euros, respectivamente.

É de lembrar que os circuitos actuais incluem, na generalidade, horas extraordinárias e que nos Modelos B e C apenas são consideradas horas extraordinárias nas equipas que fazem recolha ao sábado.

No Quadro 6.13 apresentam-se as distâncias percorridas anualmente, em quilómetros, para execução dos circuitos de recolha indiferenciada dos Modelos B e C comparativamente com a situação actual (Modelo A).

Quadro 6.13 – Distâncias percorridas anualmente (km)

		Modelo A	Modelo B	Modelo C
ETZL	Viaturas grandes (20m ³)	_____	142 412	142 412
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	102 367	102 367
ETZO A	Viaturas grandes (20m ³)	_____	233 490	_____
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	214 250	_____
ETZO B	Viaturas grandes (20m ³)	_____	_____	163 483
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	_____	122 886
Câmara de Lobos	Viaturas grandes (20m ³)	_____	_____	69 810
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	_____	91 364
CPRS	Viaturas grandes (20m ³)	_____	16 516	16 516
	Viaturas pequenas (5m ³)	_____	16 169	16 169
Total	Viaturas grandes (20m³)	349 026	392 418	392 221
	Viaturas pequenas (5m³)	373 357	332 786	332 786
		722 383	725 204	725 007

ETZO A inclui Câmara de Lobos; ETZO B exclui Câmara de Lobos

Embora com maior número de circuitos (105), actualmente percorrem-se menores distâncias na recolha de resíduos indiferenciados comparativamente com os Modelos B e C. No Modelo B percorrem-se mais quilómetros mas a necessidade de recursos humanos é menor – Quadro 6.14.

É mais vantajoso economicamente percorrer anualmente mais 3 mil quilómetros com recurso a menos pessoal.

Quadro 6.14 – Síntese conclusiva

	Nº de circuitos	Nº de viaturas	Pessoal Nº de indivíduos	Distâncias km
Modelo A	105	47	138	722 383
Modelo B	86	46	135	725 204
Modelo C	86	47	138	725 007

7 CONCLUSÃO

7.1 CONCLUSÕES

Na aplicação do *Network Analyst* ao serviço de recolha de resíduos é necessário ter em conta não só as particularidades do serviço, mas também as limitações do *software* para representar este problema.

No Quadro 7.1 apresenta-se uma síntese dos elementos e variáveis inerentes ao serviço de recolha de resíduos aplicados e discutidos no presente trabalho.

Do quadro anterior verifica-se que, de um modo geral, é possível introduzir as particularidades do serviço de recolha de resíduos no *Network Analyst*. Destaca-se apenas a impossibilidade de introduzir as características de declive da rede viária, importante em territórios com características de relevo semelhantes à RAM.

No terreno, em termos práticos, ao término do circuito de recolha antecede uma paragem para descarga dos resíduos numa instalação (quer seja de transferência ou destino final).

Para o *Network Analyst* a última paragem do circuito é a instalação de descarga da viatura, o que significa que o trajecto final do circuito, desde a instalação de descarga até ao parque de viaturas, não é representado pelo software. Este trajecto é calculado à parte.

Para determinar percursos de recolha de resíduos, o *Network Analyst* necessita de dados de entrada. Para o efeito o utilizador deve conhecer o tipo de dados de entrada a introduzir e que tipo de resultados pretende.

A velocidade aplicada no caso de estudo exposto foi uma velocidade média, ponderada de acordo com as velocidades verificadas em circuitos desde a origem do circuito até à descarga da viatura.

Num caso como o exposto, ou noutros estudos da mesma natureza, o conhecimento de indicadores relativos a velocidades praticadas é determinante na aferição da velocidade média a introduzir como dado de entrada no *software* (ver Quadro 5.3).

Para aplicação do *Network Analyst* a serviços de recolha de resíduos é fundamental o conhecimento de indicadores que, sempre que possível, devem basear-se em levantamentos de campo e tratamentos estatísticos adequados.

Para o efeito, devem os responsáveis de serviços de recolha dotar-se de ferramentas informáticas que entre outros aspectos, permitam o registo de elementos relativos a: hora de partida do parque de viaturas, hora de chegada ao primeiro ponto de recolha, hora de chegada ao último ponto de recolha, horas de chegada e partida do local de descarga da viatura, quantidades recolhidas, quilómetros efectuados nestes diferentes percursos.

Um computador portátil equipado com GPS e uma aplicação que permita o armazenamento de informação, um SIG móvel, por exemplo, constituem um instrumento de excelência para o levantamento de dados, quer numéricos, quer geográficos.

Quadro 7.1 – Síntese dos elementos necessários à representação de circuitos de recolha pelo *Network Analyst*

Operação de recolha de resíduos urbanos	ArcView GIS	Network Analyst
Rede viária:		
Designação do elemento de análise	Base de dados do tipo linha ou arco	
Modelação:		
Hierarquia da rede viária	Sim	
Sentido de circulação viária	Sim	
Cruzamentos, entroncamentos, túneis e viadutos	Sim	
Largura e existência de separador central da rede viária	Sim	
Velocidade e tempo de circulação	Sim	
Declive da rede viária	Não	
Correcção topológica	Sim	
Contentores:		
Designação do elemento de análise	Base de dados do tipo ponto	
Modelação:		
Número de contentores e capacidade por localização	Sim	
Frequência de recolha	Sim	
Quantitativos a recolher	Sim	
Lado de aproximação da viatura ao contentor	Sim	
Tempo de descarga por contentor	Sim	
Pontos de origem e chegada		
Designação do elemento de análise	Base de dados do tipo ponto	
Circuitos/percursos de recolha de resíduos		
Rede viária		<i>Network Dataset</i>
Velocidade		Sim
Restrições de sentido de circulação viária		Sim
Restrições de viragens (proibições)		Sim
Contentores		<i>Network Locations (Orders)</i>
Quantitativos a alocar	Sim	<i>PickupQuantities</i>
Lado de aproximação da viatura ao contentor	Sim	<i>CurbApproach</i>
Tempo de descarga por contentor ou por ponto de recolha	Sim	<i>Time Service</i>
Intervalo de tempo para recolha	Sim	<i>TimeWindowStart/TimeWindowEnd</i>
Origem e chegada dos circuitos		<i>Network Locations (Depots)</i>
Locais de descarga da viatura		
Tempo de descarga da viatura	Sim	<i>Time Service</i>
Locais intermédios de descarga da viatura	Sim	<i>Route Renewals</i>
Tempo de descarga da viatura	Sim	<i>Time Service</i>
Circuitos/percursos/viaturas	Sim	<i>Route</i>
Nome do circuito	Sim	<i>Name</i>
Local de saída do circuito	Sim	<i>StartDepotName</i>
Local de chegada do circuito	Sim	<i>EndDepotName</i>
Tempo de descarga da viaturas no local de chegada do circuito	Sim	<i>EndDepotServiceTime</i>
Capacidade da viatura	Sim	<i>Capacities</i>

Na aplicação do *VRP* do *Network Analyst* à operação de recolha de resíduos, os dados de entrada que alteram os percursos são o tempo total máximo do circuito, a capacidade das viaturas, os locais de partida e chegada dos percursos. Os percursos são igualmente influenciados pela definição do lado de aproximação da viatura ao contentor.

Assim, o utilizador deve conhecer o tipo de dados de entrada a introduzir e que tipo de resultados pretende:

- Se a solução *VRP* resolve o problema de modo a minimizar o tempo, então é necessário conhecer qual o tempo máximo do turno de trabalho;
- Se a solução *VRP* depende da capacidade das viaturas, então é fulcral conhecer o tipo e capacidade das viaturas de recolha;
- Se a solução *VRP* é influenciada pela restrição de aproximação da viatura ao contentor, então é fundamental conhecer e identificar, para cada ponto de recolha, o lado de aproximação da viatura;

No que diz respeito à metodologia usada na solução *VRP* para o cálculo de circuitos, numa primeira abordagem é aceitável o cálculo dos circuitos de recolha com recurso a vários percursos num mesmo problema *VRP* – um *VRP* com vários circuitos. No entanto, dificilmente esta abordagem poderá ser a final, pois, como foi apresentado no ponto 6.3.3, o resultado poderá ser facilmente questionável.

É fundamental que o utilizador conheça as características da área territorial em estudo, para, por aproximação e iterativamente, com base na primeira abordagem, agregar os pontos de recolha segundo zonas geográficas bem delimitadas – vários *VRP*, cada um com um circuito.

Em termos de resultados finais, verificaram-se circuitos de viaturas grandes que percorrem distâncias significativas, da ordem dos 70 a 90km, em 7 horas para recolher quantitativos da ordem 400 a 1000kg. Constatou-se ainda que os tempos dos circuitos são pouco equilibrados.

Este aspecto verifica-se principalmente em zonas rurais. Assim, previamente à optimização de um sistema de recolha numa perspectiva de passar de uma gestão municipal para uma gestão integrada é necessário avaliar a frequência de recolha dos resíduos.

No que diz respeito à base de dados dos pontos de recolha, ela foi desenvolvida no sentido de obter um cadastro de contentores com o objectivo de identificar os aspectos fundamentais para aplicação do *software* no cálculo de percursos de recolha, designadamente localização geográfica, número e capacidade dos contentores. Contudo, outras características poderiam ter sido levantadas, designadamente material e estado de conservação dos contentores, frequência de recolha.

Foi ainda efectuada a relação espacial entre os municípios (parques das viaturas de recolha de resíduos) e unidades de transferência/unidade de tratamento (em pleno funcionamento) para justificar ou, no caso de concelhos mais afastados, questionar a entrega dos resíduos nas estações de transferência existentes.

No entanto, num estudo cujo objectivo seja perspectivar a localização de unidades de gestão de resíduos, quer sejam estações de transferência, estações de triagem, unidades de compostagem, unidades de incineração ou aterros, as soluções de determinação de percursos (*Route*), áreas de influência (*Service Area*), instalação mais próxima (*Closest Facility*) e matriz de custos OD (*OD Cost Matrix*) constituem uma ferramenta fundamental no sentido de apoiar a selecção de um local preterindo outro.

Da análise efectuada, conclui-se que o *Network Analyst* constitui um instrumento aplicável ao serviço de recolha contribuindo assim, para a optimização da recolha de resíduos urbanos. No entanto, face ao exposto, com algumas condicionantes.

O presente trabalho mostrou ainda as vantagens na utilização dos SIG, consolidando a importância dada a este instrumento no PERSU II, que define os SIG como um utensílio essencial de gestão, a aplicar na optimização dos sistemas de recolha de resíduos.

É fundamental não só mostrar e dinamizar cada vez mais e melhor as vantagens da utilização destes instrumentos, mas também dotar, formar e incentivar técnicos, engenheiros e responsáveis por entidades de gestão de resíduos para a sua utilização.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Os SIG aplicados à gestão de resíduos urbanos apresentam um enorme potencial de oportunidades, embora seja possível constatar dificuldades nalgumas medidas decorrentes da falta de especificações e modelos de organização da informação, que necessitam de ser estabelecidas.

A ausência de especificações para bases de dados de sistemas SIG permite que cada aplicação faça uso de um conjunto de especificações essencialmente voltadas para as necessidades imediatas do utilizador. Esta prática é dispendiosa e não permite uma uniformidade de procedimentos e sinergias entre serviços que necessitam de partilhar informação.

Concretamente para representação de problemas de recolha de resíduos, é fundamental desenvolver especificações técnicas harmonizadas para a criação de bases de dados georeferenciadas de contentores. Também a criação de bases de dados de rede viária deve obedecer a especificações técnicas.

O *Network Analyst* foi desenvolvido para a resolução de problemas de transporte, no entanto, como em qualquer aplicação deste tipo, é uma ferramenta de apoio à gestão e, como tal, o utilizador deve conhecer o tipo de dados de entrada a introduzir e que tipo de resultados pretende.

De facto, o *Network Analyst* constitui, por excelência, um instrumento de apoio à decisão, mas não permite por si só a elaboração de circuitos de recolha de resíduos. Ele procura uma solução optimizada, mas uma solução optimizada por aproximação de acordo com o conhecimento/sensibilidade do utilizador. Inevitavelmente, é sempre uma solução manipulada pelo utilizador.

Assim, o utilizador tem um papel fundamental na aplicação do *software*. Para uma representação rigorosa da operação de recolha, ele tem necessariamente de conhecer as características do território em análise, quer a nível de indicadores de recolha, quer ao nível de particularidades a nível territorial.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

As sugestões de trabalho futuro que se apresentam dizem respeito essencialmente ao desenvolvimento e programação de aplicações que possibilitem a representação específica de particularidades do serviço de recolha de resíduos.

No caso de estudo apresentado, com as particularidades de relevo da RAM, constatou-se ser interessante caracterizar a rede viária relativamente ao declive.

Na caracterização da rede viária, será possível introduzir os atributos da rede Fdeclive e Tdeclive para introduzir a cota da rede viária de acordo, por exemplo, com a representação descrita no Quadro 7.2?

Cota	Atributo
< 500 m	0
500 – 1000 m	1
1000 – 1500 m	2
1500 – 2000 m	3
> 2000 m	4

Quadro 7.2 – Representação do declive na rede viária

Relativamente a particularidades do serviço de recolha de resíduos, seria importante desenvolver aplicações que permitissem a representação do regresso da viatura ao parque com descarga prévia na estação de transferência (ou outra instalação).

Nesta modelação, o programa deverá prever duas velocidades inerentes ao serviço de recolha, transporte e recolha, questão que merece dedicação e que pressupõe grande complexidade de modelação.

Referências bibliográficas

- Assad, A. A. (1988). "Modeling and implementation issues in vehicle routing". In: GOLDEN, B. L.; ASSAD, A. A. (Eds). In *Vehicle Routing: Methods and Studies*, North-Holland, Amsterdam: Elsevier Sciences Publishers.
- Barbarosoglu, G.; Ozgur, D. (1999). "A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem". *Computers and Operations Research*, v.º 26, n.º 3.
- Bodin, L. D.; Golden, B.; Assad, A.; Ball, M. (1983). "Routing and scheduling of vehicle and crews: The state of the art". *Computers & Operations Research*. v.º 10, n.º 2.
- Bronson, R.; Naadimuthu, G. (2000). "Investigação Operacional". 2ª ed., Amadora, McGraw-Hill, 2000. Tradução e revisão técnica de Ruy Costa (Professor da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa).
- Burrough, P. A. (1986). "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment". Oxford: Oxford Science Publications.
- Clarke, G.; Wright, J. W. (1964). "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points". *Operation Research*, v.º 12, n.º 4.
- Cunha, C.B. (1997). "Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais". São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes (Tese de Doutoramento).
- Decreto-Lei n.º 178/2006, do Ministério do Ambiente, de 5 de Setembro. Aprova o regime geral da gestão de resíduos. *Diário da República*, n.º 171, I Série, de 5 de Setembro de 2006, pp. 6526-6545.
- Directiva n.º 2008/98/CE do Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, de 19 de Novembro de 2008. Estabelece medidas de protecção do ambiente e da saúde humana, *Jornal Oficial da União Europeia* de 22 de Novembro de 2008.
- Directiva n.º 2007/2/CE Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, de 14 de Março de 2007. Estabelece uma infra-estrutura de informação geográfica (Directiva INSPIRE), *Jornal Oficial da União Europeia* de 25 de Abril de 2007.
- ESRI, 2007. "Formação ESRI Portugal – ArcGIS Network Analyst". Lectures. Lisboa, Portugal.
- ESRI, 2009. "Performing Network Analysis". ArcGIS Desktop Help.
- Fisher, C.; Jaikumar, R. (1981). "A generalized assignment heuristics for vehicle routing". *Networks*, v.º 11, n.º 2.
- Fischer, M. M. (2003). "GIS and Network Analysis". Em: *Handbook 5 Transport Geography and Spatial Systems*, (eds.) Vienna.
- Garcia, B. L.; Potvin, J.Y.; Rousseau, J.M. (1994). "A Parallel implementation of the tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows constrains". *Computers & Operations Research*, v.º 29, n.º 9.
- Goldberg, M. C.; Luna, H. P. L., (2000). "Optimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos". Rio de Janeiro: Campus.
- Gonçalves, L. (2002). "A Informação no Contexto do Planeamento Urbanístico". Leiria: Escola Superior Tecnologia e Gestão de Leiria, Instituto Politécnico de Leiria. Apontamentos para a disciplina de Sistemas de Informação Urbanística do Curso de Engenharia Civil.

- Karadimas, N. V.; Kolokathi, M.; Defteraiou, G.; Loumos, V. (2007). "Municipal Waste Collection of Large Items optimized with ArcGIS Network Analyst", In 21st European Conference on Modelling and Simulation ECMS, 4-6 Junho, Praga.
- Kelly J. P. and Xu, J. (1999). "A set-partitioning-based heuristic for the vehicle routing problem". *Inform Journal of Computing*, v.º 11, n.º 2.
- Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan, A. H. G., (1981). "Complexity of Vehicle and Scheduling Problems". *Networks*, v.º 11, n.º 2.
- Maguire, D.J.; Goodchild. M.F.; Rhind, D.W. (1991). "Geographical Information Systems – Principles and Applications". 1.ª ed. England: Longman Scientific & Technical.
- Martinho, M. G. M.; Gonçalves, M. G. P. (2000). "Gestão de Resíduos". Universidade Aberta.
- Matos, M. A. A., (2007). "Técnicas de Gestão de Resíduos". Apontamentos teóricos da disciplina, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. In <http://elearning.ua.pt/>
- Matos, M. A. A., (2009). "Técnicas de Gestão de Resíduos". Apontamentos teóricos da disciplina, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. In <http://elearning.ua.pt/>
- McLeod, F. N.; Cherrett, T. J. (2008). "Quantifying the transport impacts of domestic waste collection strategies". In *Waste Management*, n.º 28.
- Monteiro, A. J. (2000). "Projecto SIMAT – Sistema de Informação Municipal: Aplicações Técnicas em Tecnologia SIG – Apresentação do projecto e das instituições envolvidas". In *Revista SIMAT/ADSIA*, Porto.
- Neto, P. L. (1998). "Sistemas de Informação Geográfica". Lisboa: FCA – Editora de Informática.
- Portaria n.º 187/2007, do Ministério do Ambiente, de 12 de Fevereiro. Aprova o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU II). *Diário da República*, nº 30, I Série, de 12 de Fevereiro de 2007, pp. 1045-1118.
- Potvin, J. Y.; Kervahut, T.; Garcia, B. L.; Rousseau, J. M. (1996). "The Vehicle Routing Problem with Time Windows – Part I: Tabu Search". *Inform Journal on Computing*, v.º 8, n.º 2.
- Reeves, C. R. (1993). "Modern heuristic technique for combinatorial problems". John Wiley & Sons. Inc. New York, NY.
- Rhyner, C.; Schwartz, L.; Wenger, R.; Kohrell, M. (1995). "Waste management and resource recovery". Lewis Publishers.
- Ronen, D. (1988). "Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling". *European Journal of Operational Research*.
- Schur, D. A.; Shuster, K.A. (1974). "Heuristic Routing for Solid Waste Collection Vehicles". USEPA Office of Solid Waste Report SW-113.
- Solomon, M. M. (1987). "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows Constraints". *Operations Research*, v.º 35, n.º 2.
- Solomon, M. M.; Desrosiers, J. (1988). "Time window constrained routing and scheduling problem". *Transportation Science*, v.º 22, n.º 1.
- Stone, R.; Stearns, R.A. (1969). "For more efficient refuse collection try analyzing your System with a mathematical model". *American City*, n.º 84.

Taillard, É. D. (1993). "Paralel iterative search methods for vehicle routing problems". Networks, v.º 23, n.º 8.

Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. A. (1993). "Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues". McGraw-Hill International Editions.

Sites visitados:

<http://www.apambiente.pt> – consultado em Outubro de 2009

<http://www.naturlink.pt/> – consultado em Outubro de 2009

http://pt.wikipedia.org/wiki/Pesquisa_tabu – consultado em Outubro de 2009

http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0000009&contexto=pi&selTab=tab0 – consultado em Outubro de 2009

<http://www.routesmart.com/> – consultado em Outubro de 2009

<http://www.caliper.com/tcovu.htm> – consultado em Novembro de 2009

<http://www.esri.com/software/arclogistics/index.html> – consultado em Novembro de 2009

<http://www.esriportugal.pt/produtos/solucoes-verticais/122.html> – consultado em Novembro de 2009

<http://www.ingr.ro/upload/resurse/GeoMedia%20Transportation%20Manager.pdf> – consultado em Novembro de 2009

<http://www.fleetroute.com/e.html> – consultado em Novembro de 2009

http://www.phinformatica.pt/pagegen.asp?SYS_PAGE_ID=822276 – consultado em Novembro de 2009

<http://www.autodesk.pt/adsk/servlet/index?siteID=459664&id=12392441> – consultado em Novembro de 2009