

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jorge Amílcar da Silva Pereira

**Optimização de uma rede de recolha de
resíduos de equipamentos eléctricos e
electrónicos (REEE)**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Jorge Amílcar da Silva Pereira

**Optimização de uma rede de recolha de
resíduos de equipamentos eléctricos e
electrónicos (REEE)**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Sistemas

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Doutor José António Oliveira
e do
Professor Doutor Manuel Carlos Figueiredo

Outubro de 2011

DECLARAÇÃO

Nome:

Jorge Amílcar da Silva Pereira

Endereço electrónico: jamilcar@gmail.com **Telefone:** +351 93 765 14 95

Número do Bilhete de Identidade: 12896331

Título dissertação

Optimização de uma rede de recolha de resíduos de equipamentos eléctricos

e electrónicos (REEE)

Orientadores:

Professor Doutor José António Oliveira e Professor Doutor Manuel Carlos

Figueiredo

Ano de conclusão: 2011

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Mestrado em Engenharia de Sistemas

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO, APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

*Para todos aqueles que contribuíram para a
realização desta Tese de Mestrado*

Agradecimentos

Na realização deste trabalho foi indispensável a participação e apoio de algumas pessoas que me auxiliaram nas diferentes fases e de diferentes formas; assim não posso deixar de agradecer:

Aos professores Doutor José Oliveira e Doutor Manuel Figueiredo, pela orientação, apoio e paciência em todos os momentos até ao final deste trabalho.

A todas as pessoas da empresa Amb3e que nos disponibilizaram os dados e todo o *know-how* necessário para o desenvolvimento deste caso de estudo.

Aos meus amigos, em especial ao Simão, Nuno e Joel, que se mostraram sempre disponíveis para tudo o que fosse necessário.

À minha família, especialmente aos meus pais, que sempre me apoiaram durante todo o percurso até aqui.

À Sara, pela força, incentivo, assertividade, apoio e paciência em todos os momentos que definiram a caminhada até atingir o objectivo final.

Agradeço, também, a todos aqueles que não referi mas que de forma directa ou indirecta estiveram presentes, contribuindo para o sucesso deste trabalho.

A todos o meu muito obrigado!

Optimização de uma rede de recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE)

Resumo

Este trabalho centra-se na optimização de uma rede de recolha de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE).

A valorização de resíduos enquadra-se nas políticas ambientais de salvaguarda dos recursos naturais. As políticas de reutilização, de reciclagem e de recuperação energética conduzem a efeitos benéficos indiscutíveis. Estas políticas foram regulamentadas pelo Decreto-Lei 230/2004 de 10 de Dezembro, o qual transpôs para o quadro jurídico português as Directivas europeias sobre REEE.

Da execução deste trabalho são expectáveis benefícios económicos e ambientais, designadamente o aumento das quantidades de REEE recolhidas, a redução dos custos operacionais do sistema integrado ao nível do transporte, e ainda a redução dos níveis de poluição e consumo energético.

Palavras-chave: *Vehicle Routing Problem*, Algoritmos Genéticos, Logística, Logística Inversa, REEE, Optimização de Rotas

Collection and recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) facilities location

Abstract

This project focuses on a network optimization for collecting waste of electrical and electronic equipment (WEEE).

Waste recovery is part of the environmental policies for the protection of natural resources. Policies for reuse, recycling and energy recovery lead to unquestionable beneficial effects. These policies are regulated by Decree-Law 230/2004 of 10 December, which transposed into the Portuguese legal framework the European Directives on WEEE.

As a result of this work are expected economic and environmental benefits, including increases in the quantities of WEEE collected, reduced operating costs of the integrated transportation system, and even reducing the levels of pollution and energy consumption.

Keywords: *Vehicle Routing Problem*, Genetic Algorithms, Logistics, Reverse Logistics, WEEE, Route Optimization

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xii
Índice de Expressões	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xiv
1. Introdução	1
1.1 Relevância do Problema.....	1
1.2 Definição do Caso de Estudo	2
1.3 Metodologia de Investigação utilizada.....	3
1.4 Estrutura do Documento	4
2. Revisão da Literatura	7
2.1 Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE)	7
2.1.1 Resíduos: Definição Geral	7
2.1.2 REEE: Definição	8
2.1.3 REEE na Europa.....	8
2.1.4 REEE em Portugal.....	9
2.2 Logística associada aos REEE	10
2.2.1 Logística na cadeia de abastecimento	10
2.2.2 Logística Verde.....	11
2.2.3 Logística Inversa nos REEE	12
2.3 Problema de Rotas de Veículos	14
2.3.1 O Problema	14
2.3.2 O VRP no mundo real.....	15
2.3.3 Variantes do VRP	16
2.3.4 Métodos de Resolução do VRP	19
2.4 Algoritmos Genéticos	22

2.4.1	Operadores genéticos.....	23
3.	Descrição do Caso de Estudo	27
3.1	Amb3e.....	27
3.2	Problema	33
3.3	Locais em estudo.....	37
3.4	Pressupostos Assumidos	38
4.	Modelação Desenvolvida	41
4.1	Abordagem ao Problema.....	41
4.2	Modelação do Problema ao nível de dados.....	42
4.3	Matriz de Distâncias.....	44
4.4	Modelação do Problema de Roteamento de Veículos.....	47
4.5	Custos de Recolha.....	50
4.6	A Aplicação	52
5.	Resultados Alcançados	55
6.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	63
7.	Referências.....	65
7.1	Referências Bibliográficas	65
7.1	Referências Web	68

Índice de Figuras

Figura 1: Ciclo de Vida de um REEE.....	2
Figura 2: Cadeia de recuperação de resíduos.....	13
Figura 3: Solução de um VRP	15
Figura 4: Variantes do <i>Vehicle Routing Problem</i>	16
Figura 5 - Logo da Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos	27
Figura 6 - Gráfico Composição REEE (Peso em %).....	29
Figura 7 - Fluxos Operacionais definidos pela Amb3e	30
Figura 8 - Fluxo de REEE.....	31
Figura 9 - Pontos electrão em Portugal Continental	32
Figura 10 - Pontos de recolha	32
Figura 11 - Corporações de Bombeiros (AHBV)	32
Figura 12 - Centros de recepção e triagem	33
Figura 13 - Integração dos módulos num sistema de suporte à decisão	37
Figura 14 - Pontos Electrão em Braga e Porto.....	38
Figura 15 - Modelo ER do sistema	43
Figura 16 - Modelação da base de dados	44
Figura 17 – Esquema do cálculo da matriz de distâncias	46
Figura 18 - Heurística do vizinho mais próximo aplicada ao CVRP.....	48
Figura 19 - Adaptação da heurística ao problema da Amb3e.....	49
Figura 20 - Aplicação de cálculo de rotas e respectivos custos.....	53
Figura 21 - Modelo gráfico da aplicação integrada com <i>Google Maps</i>	54
Figura 22 - Rotas e custo de recolha no Distrito de Braga	58
Figura 23 - Rotas de recolha no Distrito de Braga.....	59
Figura 24 - Rotas e custo de recolha no Distrito do Porto.....	60
Figura 25 - Rotas de recolha no Distrito do Porto	61

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Matriz de distâncias dos pontos do distrito de Braga	57
Tabela 2 - Matriz de distâncias dos pontos do distrito do Porto	57

Índice de Expressões

Expressão 1 - Fórmula derivada de <i>Haversine</i>	45
Expressão 2 - Factor de circulação aplicado à distância calculada.....	45
Expressão 3 - Fórmula geral de custo por quilómetro	51
Expressão 4 - Fórmula geral de cálculo do custo por rota.....	52

Lista de Abreviaturas e Siglas

EEE	Equipamentos Eléctricos e Electrónicos
REEE	Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
SIGREEE	Sistema Integrado de Gestão de Recolha de Resíduos Eléctricos e Electrónicos
Amb3e	Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos
EU	União Europeia
VRP	Vehicle Routing Problem
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
DCVRP	Distance-Constrained Vehicle Routing Problem
VRPB	Vehicle Routing Problem with Backhauls
VRPPD	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery
VRPPDTW	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery and Time Windows
VRPBTW	Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows
BPP	Bin Packing Problem
TSP	Travelling Salesman Problem
CER	Catálogo Europeu de Resíduos
AG	Algoritmo Genético
CR	Centro de Recepção
UTV	Unidade de Tratamento e Valorização
AHBV	Associações Humanitárias de Bombeiros Voluntários
API	Application Programming Interface
ER	Entidade Relacionamento
GWT	Google Web ToolKit
URL	Universal Resource Locator

1. Introdução

Neste capítulo serão tecidas considerações relativamente à relevância do problema de recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos no mundo real, bem como uma pequena descrição do mesmo. Será também abordada a metodologia de investigação utilizada nesta fase inicial do trabalho.

Esta dissertação surge na sequência de um projecto de I&D desenvolvido no Centro Algoritmi e no Departamento de Produção e Sistemas da Universidade do Minho em parceria com a empresa Amb3e. O projecto de I&D visa o estudo e a racionalização de uma rede de recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos. O estudo da rede de recolha é suportado no desenvolvimento de um sistema de informação geográfico, e engloba quatro actividades principais: desenvolvimento de uma base de dados; cálculo de rotas de recolha e respectivos custos; problemas de localização; e simulação. Este trabalho de dissertação incidirá maioritariamente sobre as actividades de localização e rotas do projecto de I&D.

1.1 Relevância do Problema

A produção de equipamentos eléctricos e electrónicos (EEE) é um dos domínios da indústria transformadora com um crescimento mais rápido no mundo ocidental. Tanto a inovação tecnológica como a expansão do mercado continuam a acelerar o processo de substituição desses mesmos equipamentos. Esta evolução leva a um significativo aumento dos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE), que é imperativo gerir de um modo sustentado. Designam-se por Equipamentos Eléctricos e Electrónicos todos aqueles que necessitam de electricidade para funcionar.

A valorização de resíduos enquadra-se nas políticas ambientais de salvaguarda dos recursos naturais. As políticas de reutilização, de reciclagem e de recuperação energética conduzem a efeitos benéficos indiscutíveis, quer a nível do ambiente, quer

a nível da economia. Estas políticas foram regulamentadas pelo Decreto-Lei 230/2004 de 10 de Dezembro, o qual transpôs para o quadro jurídico português as Directivas europeias sobre REEE.

A gestão dos resíduos provenientes dos particulares assume especial relevância dado o seu elevado volume e dispersão geográfica. Para além disso, aos utilizadores de equipamentos eléctricos e electrónicos do sector doméstico é assegurada a possibilidade de entregarem os respectivos resíduos sem encargos. Tal implica a existência de sistemas de recolha selectiva eficazes, estruturados segundo regras de proximidade territorial e de fácil acesso.

1.2 Definição do Caso de Estudo

Este trabalho de investigação visa contribuir para um melhor desempenho económico e ambiental do sistema integrado de recolha de resíduos eléctricos e electrónicos, designadamente através da racionalização do sistema de recolha e do sistema logístico associado. A Figura 1 representa o ciclo de vida de um REEE.



Figura 1: Ciclo de Vida de um REEE

Os objectivos principais deste projecto incluem o estudo e análise da rede de recolha de REEE de forma a apoiar as decisões de expansão e da sua operacionalidade. Por outro lado, é indiscutível que uma adequada concepção da rede de recolha irá afectar

positivamente as quantidades de REEE recolhidas. Tal implica a adopção de critérios de proximidade territorial e de fácil acesso, que por vezes são difíceis de compatibilizar com uma gestão económica eficiente da rede.

Acredita-se que este trabalho será mais um contributo para o cumprimento de dois dos objectivos fundamentais do sistema, que são o aumento das quantidades recolhidas de REEE e o aumento da percentagem de reutilização e reciclagem destes equipamentos.

Para tal serão estudadas estratégias para a optimização de toda a rede de recolha de resíduos eléctricos e electrónicos, tendo como principal foco o estudo do problema de planeamento de rotas de veículos (VRP) bem como dos respectivos custos associados a essa recolha. Neste estudo abordar-se-ão diferentes variantes do *Vehicle Routing Problem*, bem como as melhores meta-heurísticas para a resolução do problema em questão. Em relação à actividade de localização, esta incidirá essencialmente na construção de uma matriz de distâncias de todos os pontos da rede de recolha.

1.3 Metodologia de Investigação utilizada

O tema de tese proposto surgiu no âmbito de um projecto de investigação na área da recolha de resíduos. Verificou-se a necessidade de estudar o melhor método para resolver o problema de planeamento de rotas de veículos no âmbito da recolha de REEE.

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas diferentes fontes bibliográficas, que podem ser classificadas como sendo primárias e secundárias. As fontes primárias serviram de base para toda a investigação, uma vez que foram daí retiradas as referências que serviram de suporte para dar os primeiros passos na investigação. Bons exemplos dessas fontes primárias são as teses de mestrado de Ribeiro (2009) e Salema (2007) e o livro *The Vehicle Routing Problem*, de Toth e Vigo (2002).

A utilização de repositórios científicos importantes, garantidos pela Universidade do Minho (Web b-on, Web Google Scholar, Web RepositóriUM), facilitou o acesso a artigos das diferentes áreas em análise, podendo estes artigos ser considerados fontes secundárias. Nestes repositórios científicos foram utilizadas palavras-chave, tais como: *Vehicle Routing Problem* (VRP), Algoritmos Genéticos, *Genetic Algorithms*, heurísticas, meta-heurísticas, *Reverse Logistics*, WEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment*), REEE, entre outras.

A pesquisa bibliográfica incluiu ainda o recurso a estudos considerados importantes nesta matéria, bem como a fontes de informação especializada sobre os temas em questão.

Foi bastante complexo avaliar a quantidade de leitura aceitável; contudo, quando muitas das leituras remeteram para referências já lidas, optou-se por suspender a pesquisa bibliográfica.

1.4 Estrutura do Documento

O presente documento é composto por seis capítulos. De seguida é apresentada uma breve síntese dos conteúdos de cada capítulo.

No presente capítulo (Introdução) é feita uma breve introdução ao caso de estudo, bem como às metodologias de investigação utilizadas na realização deste trabalho.

No Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) apresenta-se a revisão da literatura. Inicialmente é referida uma definição de resíduos em geral e é feito o enquadramento dos mesmos na cadeia de abastecimento; é também feita uma análise à actual situação dos REEE em Portugal e noutros países da Europa. Seguidamente, são abordados os diferentes tipos de VRP existentes, bem como alguns dos métodos de optimização que existem para a sua resolução. Por fim, são abordados os Algoritmos Genéticos no seu contexto mais geral e ainda aplicados à resolução de problemas de planeamento de rotas de veículos.

No capítulo 3 (Descrição do Caso de Estudo) é feita uma descrição detalhada do problema. É ainda apresentada uma breve descrição da empresa envolvida no projecto, seguindo-se uma abordagem ao problema propriamente dito e aos locais sobre os quais o estudo vai incidir. São ainda enumerados alguns pressupostos assumidos no desenvolvimento da modelação.

No capítulo 4 (Modelação desenvolvida) é descrita detalhadamente a modelação do problema a nível teórico, bem como as decisões tomadas na implementação do mesmo.

No capítulo 5 (Resultados Alcançados) são apresentados e discutidos os resultados alcançados com a modelação do caso em estudo.

Finalmente, no Capítulo 6 (Conclusões) é efectuada, em traços gerais, a conclusão do trabalho desenvolvido. Identificam-se ainda alguns pontos a aperfeiçoar no sentido de melhorar a modelação apresentada.

2. Revisão da Literatura

Neste Capítulo será apresentada uma revisão da literatura mais relevante sobre o problema do planeamento de rotas de veículos em geral e ainda os métodos de optimização mais relevantes. Irá ainda ser feita uma abordagem aos algoritmos genéticos no contexto do problema de roteamento de veículos. Será também apresentada uma definição legal de Resíduos em geral e Resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos em particular, bem como os seus impactos na cadeia de abastecimento.

2.1 Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE)

Nos últimos anos, nos países industrializados, tem-se verificado um aumento exponencial da produção de resíduos EEE, tanto em variedade como em quantidade. Este factor, em conjunto com uma mudança de atitudes e mentalidades, conduziu a que fossem tomadas medidas para a reintegração dos resíduos nos processos produtivos, permitindo assim um desenvolvimento mais sustentado e também melhores perspectivas para as gerações futuras.

2.1.1 Resíduos: Definição Geral

O Decreto-Lei nº 237/97, da Assembleia da República, define resíduos, tendo por base o Catálogo Europeu de Resíduos (CER), como sendo “*quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer*”. Esta é uma definição bastante abrangente, que engloba vários tipos de resíduos, tais como os produtos em fim de vida, os produtos danificados, avariados ou em fim de utilização.

2.1.2 REEE: Definição

É considerado um equipamento eléctrico e electrónico (EEE) todo aquele que necessita de energia eléctrica para funcionar. Quando estes equipamentos se encontram em final de vida ou se tornam obsoletos, passam a ser considerados resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos.

Barroso e Machado (2005, pp. 188) consideram que o fluxo de REEE é diferente do fluxo de outros resíduos urbanos, pelas seguintes razões:

- *“O crescimento dos REEE é cerca de três vezes superior ao crescimento dos resíduos urbanos normais, prevendo-se que o volume aumente, anualmente, pelo menos 3-5%.”*
- *“Devido ao seu teor em matérias perigosas, os EEE provocam problemas ambientais importantes durante a fase de gestão dos resíduos.”*
- *“A problemática ambiental associada aos REEE, devido sobretudo à presença de metais pesados, é maior que a associada aos outros constituintes dos resíduos urbanos.”*

2.1.3 REEE na Europa

No ano de 2003 surgiu uma directiva da União Europeia (WEEE 2003) para garantir a implementação, por parte dos países membros, de medidas de gestão (recolha, transporte, tratamento e reciclagem) dos REEE. Essa directiva impõe que cada organização que vende equipamentos eléctricos e electrónicos num qualquer país da União Europeia tem a obrigação de garantir a recolha e a reciclagem de uma quantidade de equipamentos equivalente ao seu volume de vendas nesse mesmo país, sendo isso feito sem que tenha qualquer tipo de custos para o cliente final.

Em traços gerais, um dos principais objectivos destas directivas é promover o aumento da reciclagem de REEE, para que, conseqüentemente, se dê uma redução do consumo de recursos e uma diminuição da deposição em aterro, contribuindo assim para uma melhoria ambiental significativa.

Segundo Fernández *et al.* (2010), que estudaram o sistema logístico de REEE implementado na Alemanha, estas directivas foram transferidas para países como a Alemanha e a Espanha no ano de 2005. Nestes dois países, as organizações decidiram cooperar e criar uma unidade central que tem a responsabilidade de fazer a recolha de uma quantidade de REEE equivalente à soma do volume de vendas de cada uma das empresas que fazem parte desta unidade.

Hischier, Wager e Gaughhofer (2005), no caso Suíço, e Turner e Callaghan (2007), no caso inglês, estudaram os impactos que as directivas europeias iriam ter no meio ambiente e o sistema de reciclagem de REEE. A Suíça foi um dos primeiros países na Europa a adoptar medidas para a gestão dos REEE, sendo que o faz desde 1998, tendo a sua lei sido actualizada no ano de 2005 para se ajustar às directivas Europeias (Web Corning). No caso inglês, as directivas da UE foram colocadas em vigor apenas em Janeiro de 2007.

2.1.4 REEE em Portugal

Em Portugal, as directivas europeias sobre REEE foram regulamentadas pelo governo português no ano de 2002 através do Decreto-Lei 20/2002 de 30 de Janeiro, sendo prevista a entrada em vigor do mesmo a partir do dia 31/12/2003. Depois desta data os produtores tinham, obrigatoriamente, de assegurar a recolha selectiva dos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos, numa relação de, pelo menos, 2kg *per capita* por ano. O Decreto-Lei determinava ainda que a percentagem de reutilização dos REEE recolhidos tinha de variar entre 50% e 75%, dependendo da categoria em que o equipamento se enquadrasse.

2.2 Logística associada aos REEE

A Logística apareceu, inicialmente, relacionada com actividades militares, devido à necessidade de abastecimento dos exércitos em cenários de guerra com medicamentos, roupa, produtos alimentares e material de combate. Ao longo dos tempos, a eficiência alcançada na gestão logística marcou, em parte, a distância entre uma derrota ou uma vitória em batalhas.

Em meados dos anos 50 a Logística foi estendida dos ambientes de combate até ao seio das organizações. Ao longo dos últimos anos esta foi ganhando cada vez mais importância dentro das organizações, pois o seu grande objectivo é obter uma melhor eficiência e racionalização dos custos ao longo de toda a cadeia de abastecimento.

2.2.1 Logística na cadeia de abastecimento

Devido à crescente evolução da Logística e de todas as áreas que esta engloba, não existe uma definição unânime para o conceito, embora aquela que foi dada pelo *Council of Logistics Management* (cit in Carvalho, 2006) seja a que reúne mais adeptos dentro da comunidade:

“Logística é a parte da Supply Chain que planeia, implementa e controla o fluxo e armazenamento eficiente e económico de matérias-primas, materiais semi-acabados e produtos acabados, bem como as informações a eles relativas, desde o ponto de origem até ao ponto de consumo, com o propósito de satisfazer as exigências dos clientes.”

De forma simples e resumida, Logística pode ser definida como uma das áreas de gestão responsável pelo movimento, armazenagem e manipulação dos produtos dos locais de produção para os locais de consumo.

No ano de 2002, o *Council of Logistics Management* introduz na sua definição de Logística o fluxo inverso dos materiais e serviços que mais tarde viria a ficar

conhecido como Logística Inversa. A definição deste órgão para o termo Logística aparece em 2003 e considera a Gestão Logística como:

“Uma parte da Gestão da Cadeia de Abastecimento que planeia, implementa e controla o eficiente e eficaz fluxo directo e inverso, e a armazenagem de produtos, serviços e informação relacionada, desde o ponto de origem até ao ponto de consumo, em ordem a satisfazer os requisitos dos clientes”.

Em RevLog (2002) é dada à Logística Inversa uma definição relacionada com questões ambientais: *“todas as actividades logísticas de recolha, separação e processamento de produtos usados, partes de produtos e/ou materiais, de forma a assegurar a sua recuperação sustentada e amiga do ambiente”.* Este campo da logística engloba todas as operações que têm como objectivo a reutilização dos produtos e materiais, mas a Logística Inversa é mais do que isto. De uma forma sucinta, a Logística Inversa pode ser definida como todo o planeamento, implementação e controlo do fluxo de materiais e serviços que, pelas mais variadas razões, ocorrem no sentido cliente – fornecedor.

2.2.2 Logística Verde

Segundo Carvalho (2006), as actividades logísticas podem ter uma grande importância económica nas organizações, mas podem também trazer efeitos prejudiciais para o ambiente. O transporte em particular é uma fonte significativa de poluição do ar, de emissão de dióxido de carbono, de acidentes e ruído.

Por volta dos anos 90, após um relatório elaborado pela Comissão Mundial do Ambiente e Desenvolvimento, em que se realçava a importância da sustentabilidade ambiental, a indústria dos transportes introduziu o conceito de Logística Verde.

A Logística Verde, através da adopção de estratégias que visam diminuir os efeitos negativos no meio ambiente e os custos de distribuição, tem como principal objectivo a redução dos impactos ambientais da actividade Logística.

Rogers e Tibben-Lembke (1999) afirmaram que as actividades da Logística Verde incluem a medida de impacto ambiental dos modos de transporte, a certificação ISO 14000, a redução do consumo de energia nas actividades logísticas e a redução do consumo de matérias.

Segundo Murphy, Poist e Braunschweig (1996), as empresas que se preocupam com questões ambientais, tendencialmente, têm melhores resultados e são mais competitivas do que a média. Em sentido contrário, as empresas mais conservadoras têm tendencialmente um menor potencial de desenvolvimento. O autor fez estas afirmações tendo por base a análise de sondagens e estatísticas do Conselho de Gestão Logística.

2.2.3 Logística Inversa nos REEE

Segundo Fleischmann *et al.* (2000), a reutilização dos resíduos implica um fluxo de materiais e de informação adicional, fluxo esse que é contrário ao fluxo tradicional. O fluxo tradicional engloba actividades de logística tradicionais, tais como abastecimento e distribuição, ao contrário do fluxo inverso que tem por base a Logística Inversa. Qualquer fluxo inverso deste tipo tem como principal objectivo reutilizar a maior quantidade possível de resíduos. Para o sucesso deste objectivo, as etapas associadas à logística inversa devem ser processadas pela seguinte ordem: recolha, inspecção/separação, reprocessamento, deposição e/ou redistribuição (Fleischmann *et al.*, 2000).

A integração da Logística Inversa na cadeia de abastecimento é bastante complexa e tem custos associados, mas os benefícios que daí provêm justificam a sua integração, pois contribui para uma redução dos impactos ambientais e dos custos globais da cadeia de abastecimento. Para Wu e Dunn (1994) a integração da Logística Inversa na cadeia de abastecimento implica os seguintes pontos:

- O planeamento da rede de transportes é mais complexo;
- Os tempos associados à recolha implicam um aumento nos tempos de entrega;

- Os sistemas de informação são mais complexos, pois têm de incluir o processo de recuperação dos resíduos.
- Custos com formação relacionada com as actividades associadas à gestão de resíduos.

Barroso e Machado (2005) apresentam um esquema que sintetiza aquilo que é a cadeia de recuperação de resíduos. O esquema está representado na Figura 2.

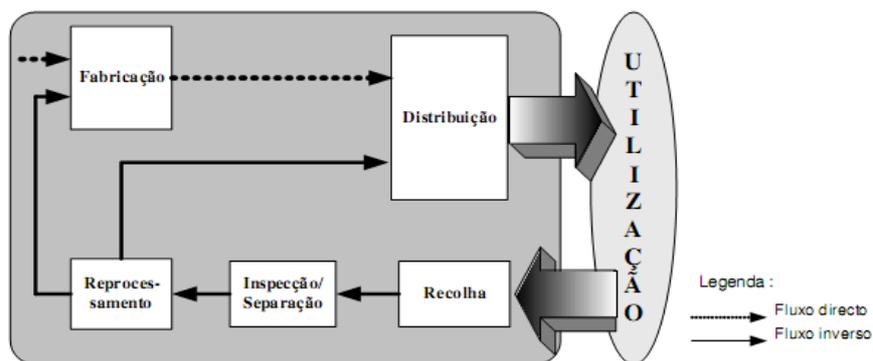


Figura 2: Cadeia de recuperação de resíduos.

Fonte: Barroso e Machado (2005)

2.3 Problema de Rotas de Veículos

2.3.1 O Problema

O problema do planeamento de rotas de veículos foi introduzido em 1959 por Dantzig e Ramser (1959). Nesse artigo os autores descrevem uma aplicação do problema no mundo real (relativo à distribuição de combustível pelas bombas de gasolina) e propõem a formulação do primeiro modelo matemático e de um algoritmo de aproximação para a resolução do mesmo. Uns anos depois, Clarke e Wright (1964) apresentaram uma heurística bastante eficaz que veio melhorar a aproximação de Dantzig e Ramser. Desde então o VRP tem sido amplamente estudado, uma vez que é um problema bastante complexo de optimização combinatória, mas com grande aplicação prática.

Fisher (1995) descreve o problema como sendo uma procura pela melhor forma de gerir uma frota de veículos para fazer entregas/recolhas de pessoas ou materiais nos clientes. O termo cliente é usado para designar as paragens feitas para entrega e/ou recolha. Cada cliente é atribuído a um determinado veículo numa ordem específica, respeitando a capacidade de cada veículo e com o intuito de minimizar os custos totais de transporte.

O problema pode ser considerado como a junção de dois problemas de optimização bem conhecidos: o problema de empacotamento (BPP) e o problema do caixeiro-viajante (TSP). O BPP é descrito da seguinte forma: dado um conjunto de números finitos (os tamanhos de cada item) e uma constante k , indicando a capacidade do contentor, qual é o número de contentores necessários para se empacotar a totalidade dos itens? (Falkenauer, 1996). Naturalmente, o tamanho de cada item não pode ser maior do que a capacidade de um contentor e o tamanho total dos itens inseridos num contentor não pode ultrapassar a capacidade do mesmo (Jünger, Reinelt e Rinaldi, 1995). O TSP é sobre um caixeiro-viajante que pretende visitar um determinado número de clientes. Normalmente associa-se cada cliente a uma cidade diferente. Ele tem de visitar cada cidade apenas uma vez, começando e terminando o seu percurso

na sua cidade de origem. O problema prende-se com a procura do caminho mais curto para visitar todas as cidades. Fazendo a analogia destas vertentes com o *Vehicle Routing Problem*, podemos afirmar que os clientes são alocados a um determinado veículo resolvendo o problema de empacotamento (BPP) e a ordem com que a visita aos clientes é feita é definida resolvendo o problema do caixeiro-viajante (TSP).

Na Figura 3 podemos observar a resolução do VRP num exemplo representado por 11 vértices. O vértice 0 corresponde ao depósito (local onde se encontra a frota). A solução apresentada é formada por três rotas, em que uma visita os vértices 5, 1, 3 e 6, outra os vértices 8, 10 e 4 e a terceira visita os vértices 9, 7 e 2.

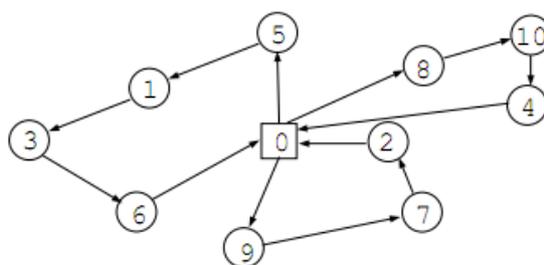


Figura 3: Solução de um VRP. O nodo 0 representa o depósito e os nodos 1 a 10 os clientes.

2.3.2 O VRP no mundo real

O VRP é um problema muito importante na vida real. Ele aparece num grande número de situações práticas, tais como o transporte de pessoas e produtos, prestação de serviços e recolha de resíduos. Por exemplo, no ciclo de vida de um simples pacote de leite surge o problema do VRP. Primeiro, o leite é recolhido nos produtores e transportado para uma empresa; depois de colocado em pacotes, é entregue por veículos nas lojas e, posteriormente, é vendido aos consumidores, que se deslocam às lojas para se abastecer. Isto acontece com a maioria dos mantimentos que são comprados diariamente. O transporte pode também ser feito por outros meios que não veículos, como por exemplo comboios e aviões. O VRP está constantemente presente ao nosso redor. Pode-se, portanto, facilmente imaginar que todos os problemas considerados como VRP são de grande importância económica. Esta importância económica tem sido uma grande motivação para as empresas tentarem encontrar

melhores métodos para resolver problemas de VRP e melhorar a eficiência dos transportes.

2.3.3 Variantes do VRP

No livro *The Vehicle Routing Problem*, os autores Toth e Vigo (2002) apresentam o *Capacitated VRP (CVRP)* como sendo a base de todas as variantes do problema VRP, uma vez que esta é a sua versão mais simples e mais estudada. Podemos dividir as restantes variantes em quatro tipos principais: *Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)*, *Distance-Constrained Vehicle Routing Problem (DCVRP)*, *Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)*, *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (VRPPD)*.

Na Figura 4 pode-se observar o esquema que representa as diferentes variantes do *Vehicle Routing Problem*.

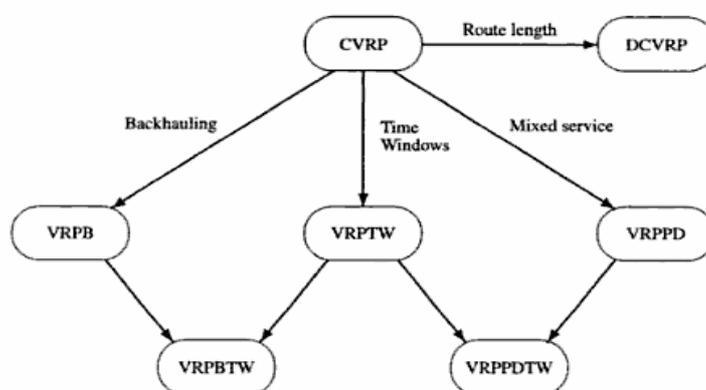


Figura 4: Variantes do *Vehicle Routing Problem*

Tendo como referencia o esquema representado na Figura 4, em seguida são identificados os aspectos que diferenciam o CVRP e as quatro principais variantes do *Vehicle Routing Problem*.

CVRP – *Capacited Vehicle Routing Problem*

No CVRP é assumido que existe uma frota de veículos com capacidade limitada, cujo propósito é a entrega aos clientes de uma quantidade previamente conhecida de

artigos que não podem ser entregues por diferentes veículos. Os veículos são idênticos e têm como ponto comum um depósito central (Toth e Vigo, 2002). Todos os veículos iniciam e finalizam a sua rota nesse mesmo depósito central. No cálculo das rotas dos veículos apenas é considerada a restrição de capacidade e o principal objectivo é a minimização de custos. A solução é válida se a quantidade de artigos a entregar por um veículo não ultrapassar a capacidade do mesmo.

DCVRP - *Distance-Constrained Vehicle Routing Problem*

A variante DCVRP é uma evolução do CVRP. Aquilo que diferencia as duas situações é a restrição de distância que é incluída na variante *Distance-Constrained Vehicle Routing Problem*. Assim, nesta variante, o objectivo é minimizar os custos nunca ultrapassando a restrição de distância de cada rota e obedecendo à restrição de capacidade dos veículos (Toth e Vigo, 2002).

VRPPD – *Vehicle Routing Problem with Pick-Up and Delivering*

Vehicle Routing Problem with Pick-Up and Delivering é, mais uma vez, uma extensão do CVRP. Nesta variante os clientes também podem retornar produtos para o depósito, logo, cada um deles é associado a uma quantidade de entrega e uma quantidade de recolha. Assume-se que em cada cliente a entrega é processada antes da recolha (Toth e Vigo, 2002). O VRPPD consiste em encontrar um conjunto de rotas tendo como objectivo a minimização dos custos, de acordo com os seguintes pressupostos:

- Cada rota tem de começar e terminar no depósito;
- Cada cliente é visitado apenas por uma das rotas;
- O veículo não deve circular vazio nem pode ser ultrapassada a sua capacidade.

A solução é válida se a quantidade a entregar e a quantidade a recolher não ultrapassarem a capacidade do veículo.

VRPB - *VRP with Backhauls*

Nesta variante a recolha de produtos também está presente. A diferença em relação à VRPPD é o facto de só se poder fazer recolha de um produto num determinado cliente, quando todas as entregas se encontrarem processadas, sendo conhecidas, previamente, as quantidades a recolher e a entregar (Toth e Vigo, 2002).

A solução é válida se todas as recolhas forem feitas depois de se realizarem todas as entregas e a capacidade do veículo for respeitada.

VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

No *Vehicle Routing Problem with Time Windows* todos os pontos a visitar têm associado um intervalo temporal chamado *Time Windows*. Nesta variante tem de se considerar o tempo que demora a viagem entre cada nodo, bem como o tempo que demora o serviço em cada cliente (Toth e Vigo, 2002). O cálculo de rotas no VRPTW tem então os seguintes pressupostos:

- Cada rota tem de começar e terminar no depósito;
- Cada cliente é visitado apenas por uma das rotas;
- A soma das encomendas dos clientes, numa determinada rota, não pode exceder a capacidade do veículo;
- Cada cliente é visitado tendo em conta uma janela temporal e essa visita demora x tempo.

Assim, a solução deixa de ser válida se o cliente não for servido dentro do seu intervalo temporal, bem como se o veículo iniciar ou terminar a sua rota fora do intervalo temporal do depósito.

Estas são então as principais variantes do *Vehicle Routing Problem*. No cálculo de rotas estas podem ser aplicadas de forma individual ou conjunta, dependendo do problema que se pretende otimizar.

2.3.4 Métodos de Resolução do VRP

Tal como foi referido anteriormente, o objectivo principal de um problema de planeamento de rotas será satisfazer os pedidos dos clientes com o menor custo, tendo em consideração um conjunto de restrições, consoante o problema. O planeamento pode ser feito para três situações:

- Uma rede de entregas;
- Uma rede de recolhas;
- Uma rede que engloba entregas e recolhas.

Segundo Barker (2009) o VRP pode ser considerado um problema de programação inteira inserido nos problemas NP – Difícil. Este tipo de problemas pode ser resolvido recorrendo a dois tipos de métodos: exactos e aproximados.

Os métodos exactos, tal como o seu nome indica, permitem encontrar soluções exactas para o problema do VRP, mas apenas é justificável a sua utilização se as rotas não variarem ao longo do tempo, pois os tempos de computação deste método são muito elevados. Nos métodos exactos, a distância percorrida é, normalmente, o objectivo a ser minimizado. Dentro dos métodos exactos, os algoritmos mais conhecidos pertencem ao grupo dos procedimentos de partição e avaliação sucessiva (*Branch and Bound*) e destacam-se as generalizações *Branch and Cut* e o *Branch and Price*.

Os métodos aproximados ou heurísticos, por sua vez, não garantem uma solução óptima. Estes métodos são bastante utilizados no mundo real, pois produzem boas soluções e os seus tempos de computação são consideravelmente mais baixos do que os dos métodos exactos. Nos métodos heurísticos o número de veículos e a distância percorrida são os principais objectivos a ser minimizados. Os métodos aproximados podem ser divididos em três categorias: heurísticas construtivas, heurísticas de pesquisa local e meta-heurísticas.

As heurísticas construtivas constroem soluções de forma gradual. Iterativamente são escolhidas as melhores soluções parciais. No final, a junção das melhores soluções parciais dá origem à solução final do problema. Normalmente, este tipo de heurísticas não gera as melhores soluções, mas pode ser uma primeira aproximação à solução final. O *algoritmo do vizinho mais próximo* foi dos primeiros a ser utilizados para resolver o problema do caixeiro-viajante. Este algoritmo gera rapidamente uma solução, mas geralmente não é a melhor, devido à sua natureza “gananciosa”. Este algoritmo, aplicado ao problema do caixeiro-viajante, funciona da seguinte forma (Laporte, 1992):

1. Início da construção da rota: Ponto de partida é no depósito;
2. Escolher um nodo Y não visitado, cujo custo (distância) entre X (nodo actual) e Y seja o menor;
3. O nodo Y passa a ser o ponto de origem;
4. Marcar o nodo X como visitado;
5. Se todos os nodos da rede já foram visitados, então encontramos a solução final, senão voltar ao ponto 2.

A aplicação deste algoritmo tem como base uma matriz de distâncias entre os diferentes nodos da rede.

Nas heurísticas de pesquisa local é, inicialmente, desenvolvida uma solução inicial. Essa solução inicial é utilizada como ponto de partida para a aplicação de um método de pesquisa local, cujo objectivo é melhorar a solução corrente, procurando iterativamente na vizinhança por uma solução melhor que a anterior. Quando é encontrada uma melhor solução, substitui-se a antiga e continua-se com a aplicação do algoritmo de pesquisa local. Quando a aplicação do algoritmo deixa de gerar melhores soluções, significa que já foi encontrada a solução mais “otimizada”, que normalmente é um óptimo local.

Um dos algoritmos de pesquisa local mais básicos é o *hill-climbing* (Oliveira, não publicado). O algoritmo *hill-climbing* é utilizado essencialmente em problemas de maximização, mas também pode ser utilizado em problemas de minimização sem que perca a sua identidade. O algoritmo é aplicado a um ponto actual X do espaço de

solução S. Em cada uma das iterações é seleccionado um novo ponto Y na vizinhança do ponto X. Caso esse ponto Y forneça uma melhor solução que o ponto X, então Y passa a ser o ponto actual, sendo este procedimento conhecido como “*first improvement*”. Se assim não for, outro vizinho é seleccionado e comparado com o ponto actual X. A aplicação do método termina se não for possível melhorar mais a solução ou se o tempo de execução chegar ao fim.

Os métodos heurísticos de pesquisa local apresentam, normalmente, melhores resultados que as heurísticas construtivas, conseguindo obter boas soluções em problemas complexos, embora o seu tempo de processamento seja muito elevado.

Por último, as meta-heurísticas englobam algoritmos de alto nível que combinam vários tipos de heurísticas, por exemplo, construtivas e de pesquisa local, em busca de um resultado de melhor qualidade. Segundo Barker (2009), este tipo de algoritmos é mais utilizado na resolução de problemas complexos, devido à sua facilidade em obter bons resultados em tempos de computação aceitáveis. *Algoritmo de pesquisa tabu*, *algoritmo do arrefecimento simulado (Simulated annealing)* e *algoritmos genéticos* são alguns dos exemplos de algoritmos meta-heurísticos. Seguidamente, será explicado o que são algoritmos genéticos e como funcionam no problema do *Vehicle Routing Problem*.

2.4 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos são um dos vários métodos meta-heurísticos que se utilizam na resolução de problemas complexos. Este método tem por base um processo iterativo sobre uma determinada população, normalmente fixa, composta por indivíduos (cromossomas) que representam as várias soluções do problema. Esta técnica advém do processo de evolução dos seres vivos demonstrada por Darwin.

Os primeiros desenvolvimentos neste tipo de algoritmos surgiram nos anos 50, ainda que a primeira publicação tenha sido proposta apenas em 1975, por um grupo de investigadores da Universidade de Michigan, coordenados pelo Professor John Holland, no livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, reeditado em 1994 (Holland, 1994). Segundo Gendreau *et al.* (2002), este trabalho de investigação só foi totalmente reconhecido pela comunidade científica 10 anos mais tarde. A partir daí, começaram a surgir diversas técnicas para a solução de problemas baseados em programação evolutiva, entre as quais os algoritmos genéticos.

Ao longo do tempo os algoritmos genéticos têm sido generalizados entre as meta-heurísticas modernas e vários autores têm estudado a aplicação dos mesmos ao problema de roteamento de veículos. Normalmente este tipo de meta-heurística é mais estudado na resolução de problemas de roteamento de veículos mais complexos, uma vez que aí o impacto no resultado final é mais significativo do que em problemas mais básicos. Baker e Ayechev (2003) mostraram que a aplicação de algoritmos genéticos a variantes mais simples do VRP podia competir com outras heurísticas modernas em termos de qualidade, tempo e resultado final.

Empregando a terminologia dos algoritmos genéticos utilizada por Mitchel (1996), podemos considerar que a forma geral de funcionamento deste tipo de algoritmos consiste em avaliar, através de uma função de aptidão (*fitness*), os indivíduos (cromossomas) de uma população, seleccionar aqueles que são considerados como mais aptos (cromossomas com mais mérito) e dar-lhes a oportunidade de, iterativamente, evoluir, trocando parte dos seus genes com recurso a operações de cruzamento (*crossover*) e mutação (*mutation*).

Superficialmente, um algoritmo genético pode ser descrito da seguinte forma (Gendreau *et al.*, 2002):

1. [Inicialização] Gerar, aleatoriamente, uma população inicial de n indivíduos (cromossomas) e determinar o *fitness* (valor) de cada um deles;
2. [Teste de Paragem] Se a condição de paragem foi satisfeita: terminar e retornar a solução inicial. Caso contrário, prosseguir;
3. [Gerar a Nova População] Gerar uma nova população através da aplicação das seguintes etapas:
 - a. [Seleção] Seleccionar dois cromossomas (pais) da população para produzir novos indivíduos (filhos);
 - b. [Cruzamento] Fazer o cruzamento dos pais para formar os novos cromossomas;
 - c. [Mutaç o] Aplicar uma muta o nos novos indiv duos;
4. [Avaliar a nova popula o] Calcular o *fitness* de cada um dos novos indiv duos da popula o;
5. [Teste de Paragem] Se a condi o de paragem foi satisfeita: terminar e retornar a melhor solu o encontrada. Caso contr rio, voltar ao ponto 3.

2.4.1 Operadores gen ticos

Os operadores gen ticos s o os mecanismos que permitem induzir altera es gen ticas nos cromossomas, de forma a alterar a qualidade da popula o. Existem v rios tipos de operadores gen ticos, sendo que os mais utilizados s o os de selec o, cruzamento e muta o. As opera es de cruzamento e muta o, normalmente, t m em conta factores probabil sticos; logo, podem ocorrer ou n o. A probabilidade de muta o   individual para cada elemento de um cromossoma. Os operadores de selec o, cruzamento e muta o podem ser aplicados de v rias formas, dependendo do problema que se pretende resolver e da sua abordagem.

Mecanismos de Selecção

Os mecanismos de selecção têm por objectivo eleger, de entre uma determinada população, indivíduos (pais) que se vão reproduzir para gerar descendentes (filhos). Normalmente, são escolhidos os indivíduos considerados mais aptos para aumentar as perspectivas de gerar melhores descendentes. Segundo Mendes (2003), a selecção pode ser feita com recurso a vários tipos de mecanismos, sendo que os mais importantes são: Selecção Através da Proporcionalidade do *Fitness*; Selecção de Boltzmann; Mudança de Escala Sigma e Selecção *Rank*.

Mecanismos de Cruzamento

Segundo Mendes (2003), os mecanismos de cruzamento permitem a troca de informações parciais entre pares de cromossomas. O cruzamento entre indivíduos é aplicado após um par ser seleccionado e se a probabilidade pré-definida de cruzamento for alcançada. Existem vários operadores de cruzamento, sendo que os primeiros a surgir foram o de um ponto de corte (1-PX) e o de k pontos de corte (k -PX). No primeiro é feita, aleatoriamente, a escolha de um ponto (ponto de cruzamento), a partir do qual os dois cromossomas fazem a permuta dos seus genes. No segundo são escolhidos, aleatoriamente, k pontos de corte e os genes entre eles são trocados. Estes dois tipos de cruzamento funcionam em problemas em que o cromossoma pode ser representado por números binários. No caso de problemas como o *Vehicle Routing Problem*, em que a codificação do cromossoma é feita através de números inteiros, tem de se optar por outro tipo de mecanismos, entre os quais se destacam o *Order Crossover* (OX), o *Partially Mapped Crossover* (PMX) e o *Cycle Crossover* (CX) (Potvin, 1996).

Mecanismos de Mutação

Para Mendes (2003), a mutação pode ser considerada um mecanismo secundário nas operações dos algoritmos genéticos. Este mecanismo tem como propósito provocar mudanças aleatórias de um ou mais genes dos indivíduos da população, fazendo com que alguns dos cromossomas adquiram propriedades genéticas diferentes da maioria da população. Com este mecanismo evita-se que as soluções converjam para um

óptimo local. Segundo Potvin (1996), os operadores de mutação mais usados no problema do *Vehicle Routing Problem* são o *Swap*, o *Local Hill-climbing* e o *Scramble*.

3. Descrição do Caso de Estudo

Com a actual crise mundial, que a cada momento coloca novos entraves às empresas que ainda sustentam a nossa economia, torna-se cada vez mais importante inovar para não perder de vista o “comboio do desenvolvimento”. Uma aposta em sistemas de apoio à decisão que permitam controlar em tempo real o estado de um negócio, os factores internos ou externos que ameaçam a sua viabilidade ou até onde se pode melhorar para atingir todos os objectivos, é um bom impulso para que as organizações se mantenham firmes face aos desafios do dia-a-dia. Essa foi uma necessidade sentida pela empresa Amb3e para conseguir melhorar a gestão de todos os seus processos de negócio. Devido à rápida expansão da sua rede de recolha de EEE, a Amb3e decidiu apostar num sistema de suporte à decisão que lhe permitisse fazer a gestão, em tempo real, de todo o seu negócio. Para que melhor se compreenda o enquadramento do projecto aqui apresentado, apresenta-se, em seguida, uma breve descrição desta empresa.

3.1 Amb3e



Figura 5 - Logo da Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos

A Amb3e – Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos (Figura 5) é uma organização sem fins lucrativos criada em Março de 2006, por um grupo de 57 produtores de equipamentos, a operar em Portugal, que se juntaram para responder à directiva 2002/96/EC da União Europeia. A Amb3e é responsável por projectar e gerir um sistema integrado de recolha e reciclagem de equipamentos eléctricos e electrónicos em fim de vida.

A directiva referida anteriormente define «Equipamentos Eléctricos e Electrónicos», ou «EEE», como sendo “equipamentos cujo adequado funcionamento depende de correntes eléctricas ou campos electromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos...” (directiva 2002/96/EC).

A Directiva da União Europeia classifica ainda os EEE em dez categorias diferentes:

- Grandes electrodomésticos;
- Pequenos electrodomésticos;
- Equipamentos de informática e de telecomunicações;
- Equipamentos de consumo;
- Equipamentos de iluminação;
- Ferramentas eléctricas e electrónicas;
- Brinquedos e equipamentos de desporto e lazer;
- Aparelhos médicos;
- Instrumentos de monitorização e controle.

Um equipamento eléctrico ou electrónico pode transformar-se em resíduo por algumas das seguintes razões:

- Não funciona e não pode ser reparado;
- É reparável, mas o custo de reparo é alto em relação à compra de um novo, com mais funções e prazo de garantia;
- Faz parte de um outro equipamento que não funciona;
- Faz parte de um outro equipamento que funciona, mas é tecnicamente obsoleto e foi substituído por um equipamento mais actual.

A composição dos REEE pode variar muito entre os diferentes produtos. Os principais materiais, em termos de massa, são o ferro, o cobre, os plásticos, o vidro e as cerâmicas. Além destes materiais, utilizados em grandes quantidades, existem outros que são utilizados em quantidades relativamente pequenas (Figura 6).

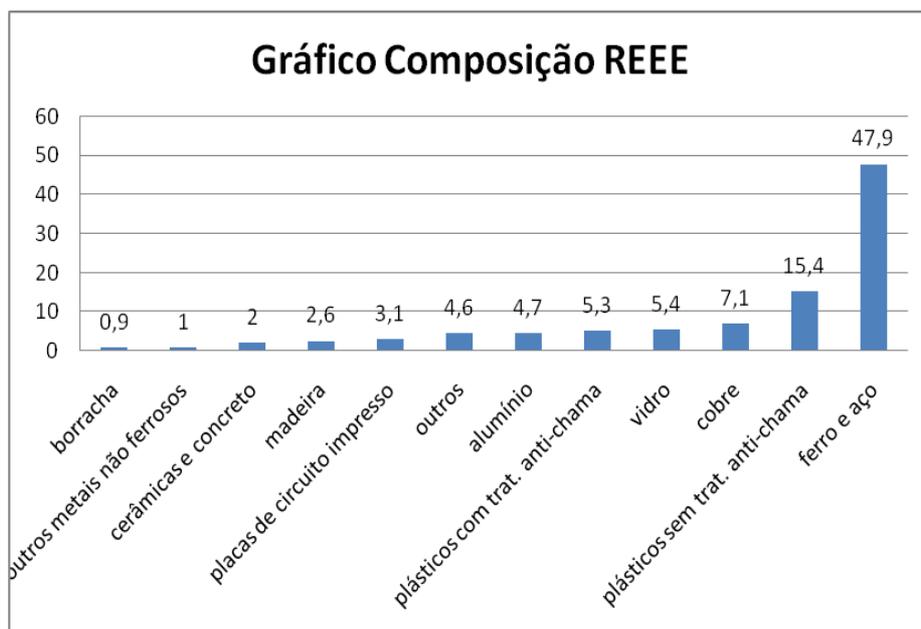


Figura 6 - Gráfico Composição REEE (Peso em %)

Fonte: European Topic Centre, 2006

A Amb3e faz a gestão da recolha, separação e tratamento destes materiais, a nível nacional. Para isso dispõe de uma rede de recolha já constituída, mas que, conforme as necessidades, pode sofrer mudanças a nível de quantidade ou localização de pontos de recolha, centros de recepção e tratamento, operadores logísticos com os quais trabalha, entre outras entidades.

O fluxo de recolha e recuperação dos REEE engloba três tipos de entidades principais:

- “Produtores” de REEE
- Centros de recepção
- Unidades de tratamento e valorização

Os “produtores” de REEE podem ser de diferentes tipos: escritórios, empresas, consumidores individuais, fábricas que têm de substituir os equipamentos antigos por novos, entre outros. Estes “produtores” colocam os seus equipamentos em final de vida em pontos de recolha disponibilizados para o efeito, podendo também entregá-los directamente nos centros de recepção quando os produzem em grandes

quantidades. Os consumidores podem também entregar os seus REEE aquando da compra de novos equipamentos.

Os centros de recepção são as entidades que recebem os equipamentos após estes serem recolhidos nos pontos de recolha, por operadores logísticos contratados pela Amb3e. Nestas instalações é também feita a pesagem e triagem dos equipamentos em cinco fluxos operacionais distintos (Figura 7). Estes equipamentos deveram chegar o mais íntegros possível ao centro de recepção.



Figura 7 - Fluxos Operacionais definidos pela Amb3e

Fonte: Amb3e

Após a realização desta triagem, os equipamentos em fim de vida são enviados para as Unidades de Tratamento e Valorização (UTV).

Nas Unidades de Tratamento e Valorização é feito o desmantelamento dos equipamentos, sendo também removidos os componentes e substâncias perigosas dos mesmos. Após este processo, os componentes são encaminhados para valorização e eliminação.

Existem ainda alguns “produtores”, normalmente distribuidores de equipamentos eléctricos e electrónicos específicos, que, uma vez que os resíduos que produzem não

necessitam de uma triagem, podem entregar os REEE directamente nas unidades de tratamento e valorização.

A Figura 8 representa todo o fluxo dos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos.

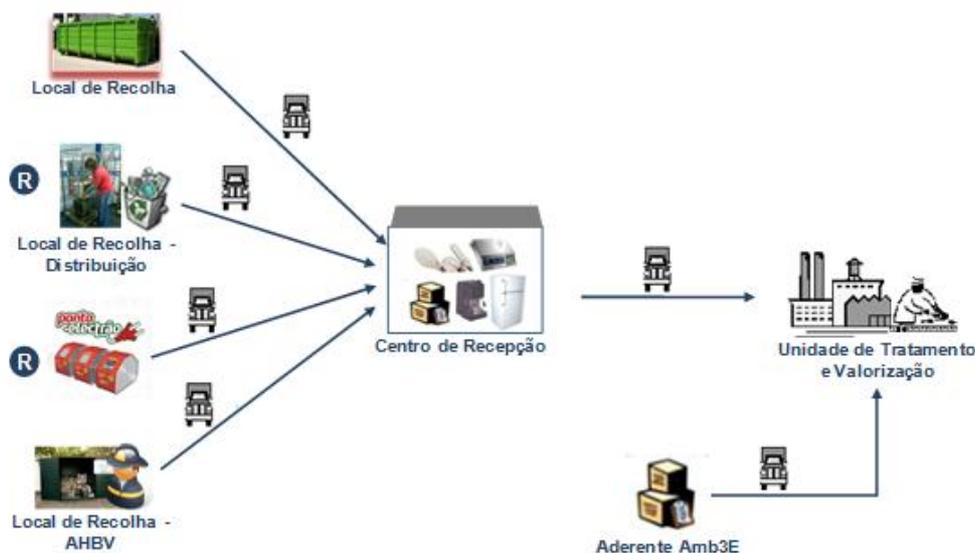


Figura 8 - Fluxo de REEE

Fonte: Amb3e

Como se pode verificar na Figura 8, o consumidor dispõe de variados locais nos quais pode depositar os seus equipamentos eléctricos e electrónicos em fim de vida:

- Pontos Electrão
- Locais de Recolha
- Associações de Bombeiros Voluntários

Os pontos electrão podem normalmente ser encontrados em superfícies comerciais, sendo que actualmente (2011) existem cerca de 67 pontos espalhados por todo o território de Portugal continental (Figura 9).

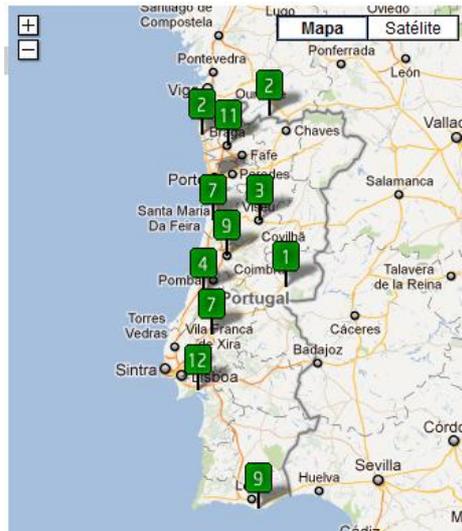


Figura 9 - Pontos electrão em Portugal Continental

Fonte: www.amb3e.pt (22-08-2011)

Existem ainda 110 pontos de recolha, como por exemplo, ecocentros (Figura 10). A Amb3e tem também acordos com 23 corporações de bombeiros que recebem os REEE nas suas instalações (Figura 11), sendo estes posteriormente recolhidos pelos operadores logísticos.

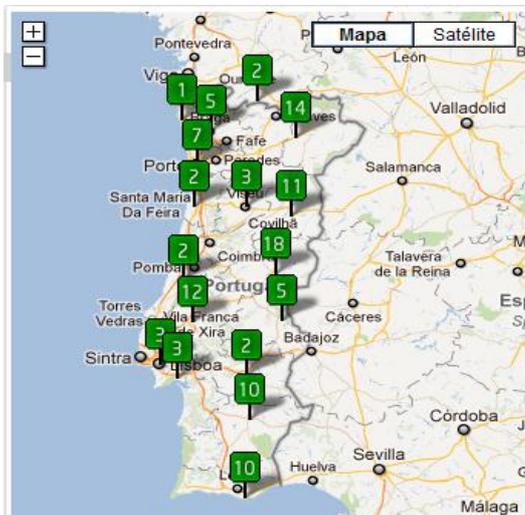


Figura 10 - Pontos de recolha

Fonte: www.amb3e.pt (22-08-2011)



Figura 11 - Corporações de Bombeiros (AHBV)

Fonte: www.amb3e.pt (22-08-2011)

Algumas Câmaras Municipais também disponibilizam meios para recolha de REEE de grandes dimensões, sendo que estas recolhas são feitas em dias específicos definidos localmente.

Relativamente aos centros de recepção, existem cerca de 92 centros em todo o território continental (Figura 12). Os Pontos de recolha distinguem-se dos Centros de Recepção pelo facto de não efectuarem triagem, apenas recebem e acondicionam os REEE.



Figura 12 - Centros de recepção e triagem

Fonte: www.amb3e.pt (22-08-2011)

A recolha e transporte dos equipamentos em fim de vida, entre as diferentes entidades, são assegurados por diversos operadores logísticos. Os operadores são subcontratados pela Amb3e para fazer a recolha dos REEE em diferentes zonas do país, normalmente nos pontos de recolha e pontos electrão (pontos assinalados com um “R” na Figura 8).

A Amb3e não é a única entidade a operar em Portugal, existe uma outra empresa que faz recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos no território nacional.

3.2 Problema

Com a rápida expansão da rede de recolha de REEE, a Amb3e sentiu a necessidade de ter um sistema que lhe permitisse fazer uma gestão, em tempo real, de todo o tipo de informação sobre o seu negócio. Esse sistema, para além da facilidade de armazenamento de dados, tem como principal objectivo servir como uma ferramenta

de suporte a decisões que a empresa tem de tomar no dia-a-dia. Normalmente estas decisões têm sempre como principal objectivo contribuir para um melhor desempenho económico e ambiental, designadamente através da racionalização do sistema logístico associado à recolha e valorização de REEE, bem como o aumento das quantidades recolhidas e das taxas de reutilização; a redução dos custos operacionais ao nível do transporte, armazenagem, triagem e dos níveis de poluição e consumo energético.

Foi então proposto à Amb3e um projecto de I&D cujo objectivo era projectar e implementar uma ferramenta que suprisse algumas das carências assinaladas pela empresa. Carências que, em traços gerais, passam pela necessidade de ter ferramentas de apoio à decisão ligada à expansão da rede actualmente existente, nomeadamente a localização de novos Centros de Recolha, bem como analisar o impacto de uma alteração estratégica que constitui a introdução de Centros de Recepção e Recolha na rede.

Essa proposta foi constituída por quatro fases principais que estão interrelacionadas:

- Concepção de um Sistema de Informação Geográfica (SIG);
- Estudo da localização dos centros de recepção e recolha;
- Estudo de toda a rede ponto electrão;
- Integração de todos os módulos para obter um sistema final.

Concepção de um Sistema de Informação Geográfica

Nesta fase do projecto, o objectivo seria recolher todo o tipo de informação relevante para apoiar a gestão estratégica e operacional da rede de recolha da Amb3e. Esta informação pode ser catalogada em quatro tipos:

- Características socioeconómicas e demográficas da população de Portugal Continental;

- Dados gerais relativos às actividades económicas em geral, e às actividades ligadas à gestão de REEE em mais pormenor;
- Redes actuais e projectadas dos sistemas de recolha da Amb3e;
- Fluxos actuais.

Este levantamento teve como principais fontes o Instituto Nacional de Estatística – INE (Censos 1991 e 2001; estatísticas económicas) e a Amb3e. No caso dos dados da Amb3e seriam utilizados dados da actividade da empresa nos últimos anos, incidindo particularmente na localização e caracterização dos Centros de Valorização, Centros de Recepção e Recolha, cliente e operadores logísticos, bem como dados associados ao fluxo de recolhas nos Pontos Electrão.

Após o levantamento destes dados, o próximo passo seria implementar um sistema de armazenamento para todos os dados recolhidos. Estes dados teriam de ser associados a atributos geo-referenciativos, por forma a permitir uma fácil exportação dos mesmos para uma ferramenta SIG.

Estudo da localização dos centros de recepção e recolha

Nesta fase do projecto, o objectivo seria fazer um estudo exaustivo da rede de recolha, por forma a satisfazer três objectivos fundamentais:

- Minimização das distâncias percorridas;
- Maximização do atendimento;
- Maximização da qualidade de cobertura da rede em todo o território.

A minimização da distância total percorrida de cada ponto de procura (cliente) ao seu centro mais próximo (depósito) tem como objectivo diminuir os custos associados à recolha (operadores logísticos).

A maximização do atendimento prende-se com a necessidade de maximizar o número de pontos de procura servidos.

A maximização da qualidade de cobertura da rede em todo o território está directamente ligada com a intenção de aumentar o número de pontos de procura que se encontram a uma dada distância do seu centro mais próximo.

Estes problemas podem ainda ser complementados com restrições adicionais que estabelecem capacidades e distâncias máximas entre depósitos e clientes.

Para resolver tais problemas, pretende-se desenvolver um sistema de apoio à decisão para a solução de problemas de optimização combinatória, aplicável à análise de redes com Sistemas de Informação Geográfica; e integrar no SIG os algoritmos de localização desenvolvidos.

Estudo de toda a rede ponto electrão

Nesta fase do projecto o objectivo seria estudar toda a rede de recolha associada aos pontos electrão, tendo como principal meta o estudo do problema de roteamento de veículos e dos seus respectivos custos.

O problema de roteamento de veículos, conhecido por ser um problema NP-difícil, normalmente usa aproximações heurísticas para obter as melhores soluções para uma determinada instância do problema. No caso da Amb3e, o problema enquadra-se no problema geral de *Capacited Vehicle Routing Problem (CVRP)*, pois todos os operadores logísticos ligados à Amb3e utilizam veículos com capacidades semelhantes.

No final desta fase o objectivo principal seria o desenvolvimento de métodos heurísticos que permitam a definição de rotas, e que serão integrados na solução geral do sistema de apoio à decisão.

Integração dos módulos no sistema de suporte à decisão

A integração de todos os módulos desenvolvidos será feita para assim se obter um sistema de apoio à decisão que possibilite ajudar os responsáveis da Amb3e a tomar decisões estratégicas benéficas para a empresa.

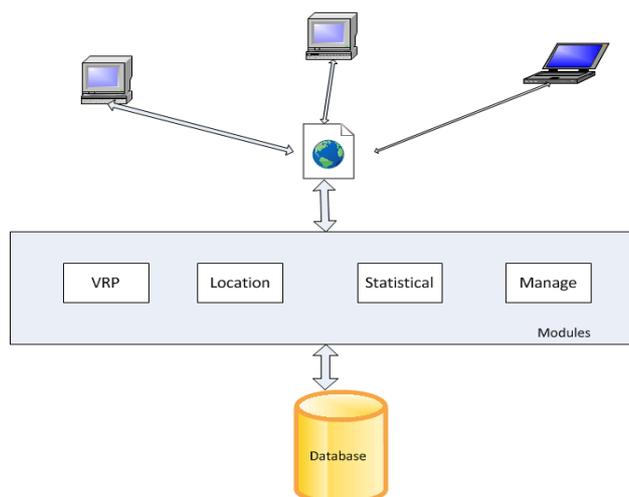


Figura 13 - Integração dos módulos num sistema de suporte à decisão

O objectivo seria assentar todos os módulos numa aplicação “web” que permita o acesso à mesma de qualquer ponto de uma rede local (Figura 13). Essa aplicação, através de uma *API (Application Programming Interface)* java, permitirá a comunicação com o Google Maps para facilitar a visualização de todos os elementos relevantes da rede logística. Essa API é disponibilizada pela empresa Google e permite o desenvolvimento de procedimentos assentes na mesma.

Este trabalho vai incidir maioritariamente sobre o estudo da rede ponto electrão, no que diz respeito aos elementos ligados à gestão da rede de recolha, mas sem nunca perder de vista o problema do sistema de apoio à decisão como um todo.

3.3 Locais em estudo

Face ao tamanho da rede de recolha de REEE, decidiu-se utilizar uma versão reduzida do problema e tratar, inicialmente, dois distritos, de modo a facilitar o processo de modelação. Foram escolhidos os distritos de Braga e Porto, devido a um maior conhecimento da realidade dos mesmos, mas também pelo facto de terem uma grande densidade populacional e um grande número de pontos electrão.

vamos assumir que todos os veículos têm capacidade para recolher doze pontos electrão;

2. No momento da recolha todos os pontos electrão encontram-se no limite das suas capacidades de armazenamento;
3. Uma rota é composta por um conjunto de pontos a visitar de forma sequencial.
4. Apenas os pontos electrão serão considerados como pontos a visitar (recolher).
5. Todas as rotas começam e terminam no Centro de recolha que está associado a cada operador logístico;
6. Em cada visita a um ponto de recolha, os resíduos de todos os pontos electrão são recolhidos, desde que o veículo tenha capacidade. Caso não tenha capacidade suficiente para todos eles, recolhe o número suficiente para atingir a sua capacidade máxima.
7. Uma rota de recolha só termina quando um veículo tiver atingido a sua capacidade, não existirem mais pontos electrão para visitar ou tenha atingido o tempo máximo de actividade;
8. Cada rota tem um custo fixo de saída do veículo;
9. Cada “visita” a um ponto electrão tem um custo fixo para a Amb3e, que está associado ao custo de carregamento dos resíduos nos veículos;
10. A única restrição é a capacidade máxima dos veículos.
11. Apenas são considerados no cálculo das rotas de recolha os pontos electrão com coordenadas de localização definidas.

12. Todos os dados foram fornecidos pela empresa Amb3e, sendo referentes aos últimos anos de actividade.

4. Modelação Desenvolvida

Actualmente a Amb3e subcontrata operadores logísticos para fazer a recolha dos resíduos eléctricos e electrónicos por todo o país. Aquando da negociação dos contratos com estes parceiros, a Amb3e não tinha bem definida uma base de informação que lhe permitisse suportar a sua perspectiva relativamente aos valores monetários envolvidos nesses mesmos contratos. A modelação que neste capítulo é descrita foi feita tendo por objectivo colmatar essa dificuldade, permitindo assim à Amb3e assentar as suas decisões nos valores base calculados pela solução.

4.1 Abordagem ao Problema

Numa primeira fase de modelação o objectivo foi recolher toda a informação relevante para o problema, tendo por base os requisitos que o sistema de suporte à decisão tinha de satisfazer. Para tal, e depois de analisar esses mesmos requisitos, decidiu-se usar duas fontes de informação principais:

- Amb3e;
- Instituto Nacional de Estatística.

Com a Amb3e, e através de um trabalho cooperativo, tentou-se obter o máximo de informação possível e adquirir o *know-how* necessário para iniciar a modelação do problema.

Do INE retirou-se e catalogou-se toda a informação relevante no que diz respeito às características socioeconómicas da população portuguesa. Estes dados podem servir como base de um possível replaneamento de toda a rede de recolha, mais concretamente a reorganização dos locais de recolha, tendo em conta as necessidades e os hábitos da população.

Após o levantamento desta informação, foi feita uma filtragem da informação mais relevante e esta foi organizada tendo por base as diferentes entidades presentes no problema, que serviram de base para o próximo passo: a modelação dos dados.

4.2 Modelação do Problema ao nível de dados

Após o levantamento de toda a informação relevante sobre o problema e sua análise, bem como dos dados disponibilizados pela Amb3e e da sua consequente filtragem, tentou-se interligar todos os pontos para assim chegar a um modelo Entidade Relacionamento (ER) que suportasse todos os dados relevantes para o desenvolvimento do projecto.

As entidades definidas como relevantes no problema são:

- Ponto de Recolha;
- Centro de Recepção;
- Unidade de Tratamento e Valorização;
- Ponto Electrão;
- Operador Logístico.

Entre as entidades, existem fluxos de REEE que serão integrados na base de dados. Consideram-se os seguintes fluxos:

- Centro de Recepção → Unidade de Tratamento e Valorização (CR_UTV);
- Ponto de Recolha → Centro de Recepção (PR_CR);
- Ponto de Recolha → Unidade de Tratamento e Valorização (PR_UTV).

Na Figura 15 podemos visualizar essas entidades e respectivo relacionamento entre as mesmas, assim como os fluxos referidos.

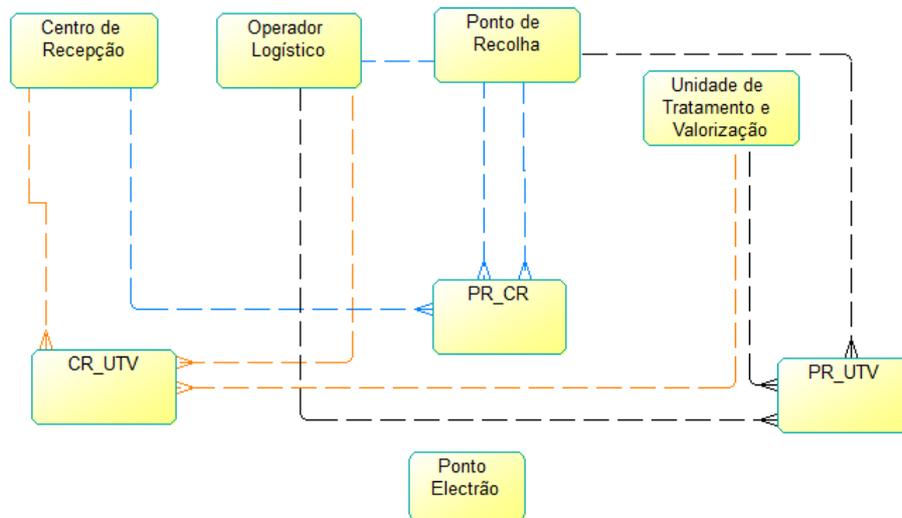


Figura 15 - Modelo ER do sistema

Com a conclusão do modelo ER passou-se ao desenvolvimento de todas as entidades para se chegar a um modelo de base de dados no qual iriam assentar todos os processos do sistema de suporte à decisão.

No que diz respeito ao problema de roteamento de veículos, o qual vai incidir sobre o cálculo de rotas entre os pontos electrão e o centro de recolha do respectivo operador logístico, as entidades mais relevantes são:

- Ponto Electrão
- Centro de Recolha
- Operador Logístico

A estas entidades foi necessário adicionar alguma informação importante para o problema, como é o caso da sua localização ao nível de coordenadas cartesianas e da sua organização por concelho/distrito. Afigurou-se também necessário adicionar uma estrutura para armazenar dados relativos a distâncias entre os diferentes pontos da rede. O cálculo dessas distâncias é descrito no próximo subcapítulo.

Chegou-se assim a um modelo que suporta todos os dados considerados necessários para o problema de roteamento de veículos. Na Figura 16 podemos visualizar esse módulo numa forma resumida.

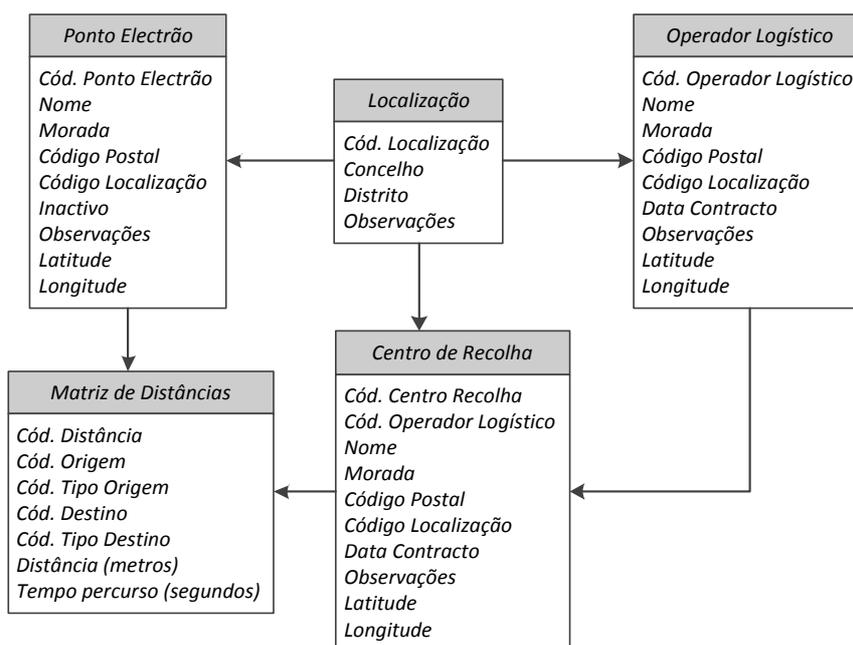


Figura 16 - Modelação da base de dados

Após a obtenção do modelo de dados foi necessário criar processos de migração de dados para assim povoar as diferentes entidades da base de dados com os dados anteriormente recolhidos e tratados. A base de dados foi implementada na solução *MySQL*, pois é uma solução que, dado o volume de dados moderado, satisfaz as exigências do sistema. Para além disso, o que mais influenciou a sua escolha foi o facto de a solução *MySQL* não acarretar para a empresa Amb3e custos extra com licenças de *software*, uma vez que a sua utilização é gratuita.

4.3 Matriz de Distâncias

Após a construção deste modelo de dados, o próximo passo foi a construção de uma matriz que definisse as distâncias entre os diferentes pontos da rede de recolha (incluindo os centros de recolha).

Foram analisados alguns algoritmos que, através da aplicação de fórmulas a coordenadas geográficas, calculam uma distância aproximada entre dois pontos. Um exemplo desses algoritmos é a fórmula de *Haversine* (Web Haversine), normalmente utilizada na navegação. Esta fórmula é uma variante de uma fórmula mais geral de

trigonometria esférica, a lei de *Haversines*, a qual relaciona os lados e ângulos de “triângulos esféricos”.

$$d = \frac{\text{acos}[\sin(\varphi_1) * \sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \cos(\lambda_2 - \lambda_1)] * \pi * R}{180}$$

Expressão 1 - Fórmula derivada de *Haversine*

Onde:

- D é a distância calculada entre dois pontos de uma esfera
- R é o raio da esfera
- φ_1 é a latitude do ponto 1
- φ_2 é a latitude do ponto 2
- λ_1 é a longitude do ponto 1
- λ_2 é a longitude do ponto 2

A esta fórmula pode ainda ser aplicado um factor de circulação (*FC*) para assim aumentar a sua eficácia de cálculo. O factor de circulação varia consoante a tipologia do terreno onde se situam os pontos sobre os quais recai o cálculo.

$$d = d * FC$$

Expressão 2 - Factor de circulação aplicado à distância calculada

Com este factor pretende-se obter uma distância mais aproximada da distância rodoviária entre dois pontos.

Após a análise destas fórmulas, e tendo em consideração o facto de este ser um problema que necessita de dados muito aproximados da realidade, decidiu-se optar por uma solução mais tecnológica, que possibilitasse essa aproximação da realidade. Para tal, foi usada como base de cálculo uma ferramenta *online*, disponibilizada pela empresa *Google* e conhecida por *Google Maps*, que permite o cálculo de distâncias entre dois ou mais pontos de um mapa. Com esta abordagem, para além da distância

entre dois pontos, consegue-se também ter acesso à duração média de cada trajecto, o que permite no futuro adicionar novas restrições ao problema.

Para conseguir calcular distâncias entre todos os pontos da rede foi necessário fazer centenas de “invocações” ao Google. Entende-se por “invocação” o cálculo da distância entre dois pontos. Como tal, e como era impossível fazê-lo manualmente, foi usada uma *framework* denominada *Google Web ToolKit* (GWT) para a linguagem *Java*. Esta é uma *framework open source* disponibilizada pela empresa Google, logo não implica qualquer custo para a empresa Amb3e.

Foram então implementadas rotinas na linguagem *Java* que, usando métodos disponibilizados na *framework* GWT, fazem chamadas ao *Google Maps* via URL de um *browser* de internet, usando como parâmetros as coordenadas cartesianas (latitude e longitude) dos dois pontos sobre os quais queremos calcular uma distância. Como resposta ou resultado é apresentada a distância entre os dois pontos e, posteriormente, através de uma outra rotina (método), usando o *input* e *output* da rotina anterior, cria uma nova entrada na tabela de distâncias da base de dados. O esquema de todo este processo pode ser observado na Figura 17.



Figura 17 – Esquema do cálculo da matriz de distâncias

Este é um processo que, dependendo do número de pontos sobre os quais recaem os cálculos, pode ser bastante demorado na sua primeira execução, pois implica $N * N$ invocações ao *Google Maps*, sendo N o número de pontos da rede. Existem ainda limitações no número de solicitações diárias que podem ser feitas.

4.4 Modelação do Problema de Roteamento de Veículos

Após a obtenção, tratamento e armazenamento de toda a informação necessária sobre: características dos pontos electrão e localização dos mesmos; características dos operadores logísticos e a sua localização; matriz de distâncias entre todos os pontos da rede. Procedeu-se à modelação do problema de roteamento de veículos para o cálculo de rotas de recolha dos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos.

Tal como referido anteriormente, o problema de recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos da Amb3e pode ser enquadrado no problema clássico de roteamento de veículos com restrições de capacidade, embora numa versão um pouco alterada, uma vez que funciona num fluxo inverso, pois o objectivo é recolher quantidades de “produtos” e não entregá-las. Os veículos normalmente utilizados nessa recolha são idênticos e todas as rotas têm como ponto comum um depósito central, onde iniciam e finalizam a recolha. A solução é válida se as quantidades recolhidas por um veículo não ultrapassarem a capacidade do mesmo. Assim, este problema enquadra-se na definição de CVRP proposta por Toth e Vigo (2002).

Depois de analisadas algumas heurísticas para a resolução do problema de roteamento de veículos com restrições de capacidade e da sua razão custo/benefício de implementação, a decisão passou por modelar o problema utilizando a heurística construtiva do vizinho mais próximo (*nearest neighbour*). Embora esta não seja uma heurística que permita encontrar, na maior parte dos casos, soluções aproximadas da óptima, é uma heurística com um custo de implementação mais reduzido e que de certa forma se adequa às necessidades da Amb3e, uma vez que o objectivo do cálculo das rotas não se prende com intenção de encontrar caminhos óptimos para a recolha de resíduos EEE, mas sim obter um custo aproximado da recolha dos mesmos, numa determinada zona, para assim utilizar esta informação como base negocial com os operadores logísticos. A obtenção das melhores soluções ao nível das rotas de recolha é responsabilidade dos operadores logísticos e não da Amb3e.

Com a aplicação da heurística construtiva do vizinho mais próximo ao problema de roteamento de veículos com restrições de capacidade, a solução é construída através da adição de todos os pontos individualmente à solução final, tendo sempre presente a restrição de capacidade do veículo. O critério utilizado na adição de pontos à solução é a distância entre dois pontos, sendo o ponto escolhido para ser adicionado aquele que se encontra a uma menor distância do seleccionado anteriormente. Na Figura 18 poderá ser observado o diagrama que representa o algoritmo utilizado na heurística construtiva do vizinho mais próximo aplicado ao problema de roteamento de veículos com restrições de capacidade.

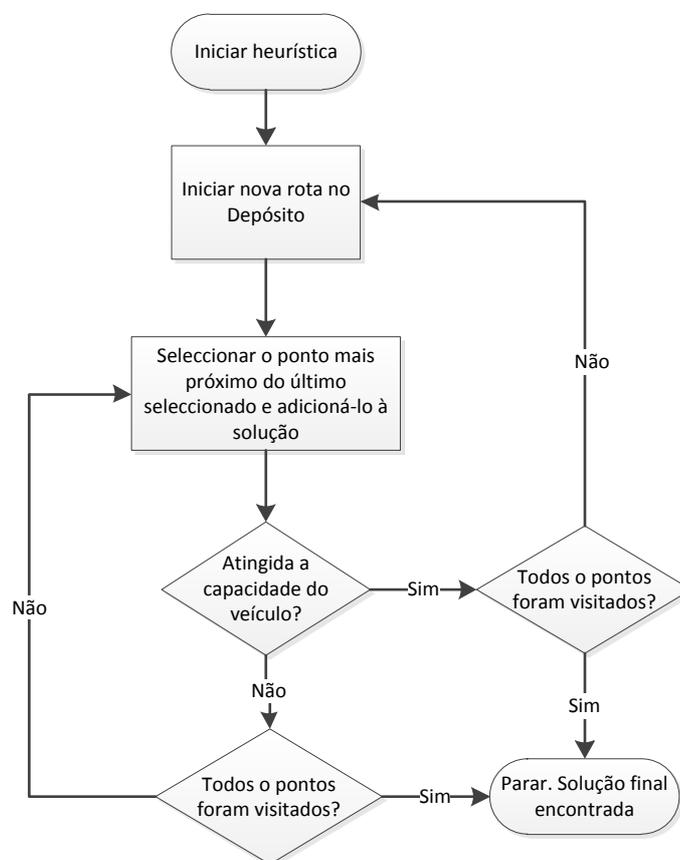


Figura 18 - Heurística do vizinho mais próximo aplicada ao CVRP

Na adaptação da heurística ao problema em questão teve de ser efectuado um pequeno ajuste, que se prende com o facto de em cada ponto de recolha poder existir mais do que um ponto electrão. Caso esta situação se verifique, o veículo pode já não ter capacidade suficiente para recolher os resíduos de todos os pontos electrão; neste caso, recolhe tantos pontos electrão quanto conseguir, até atingir a sua capacidade máxima, regressando posteriormente ao depósito. Na próxima rota esse ponto

continuará como “não visitado”, faltando apenas recolher os REEE dos restantes pontos electrão. Na Figura 19 está representada uma situação em que se aplica esta solução.

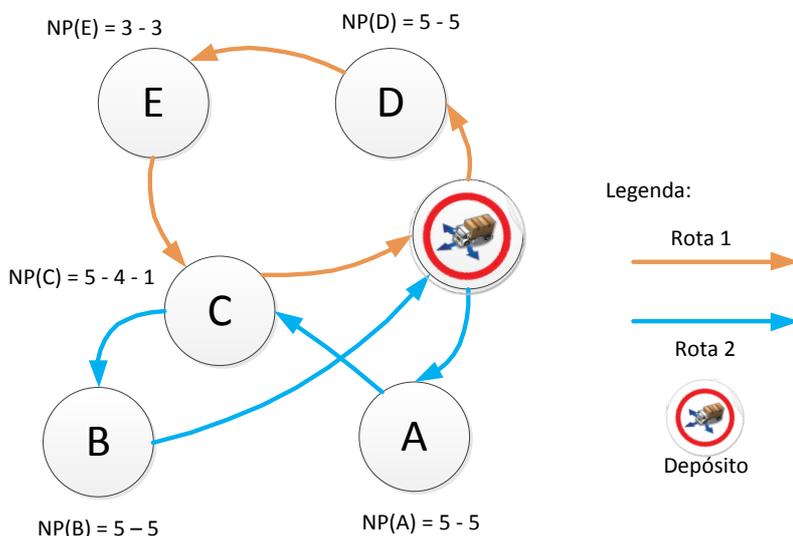


Figura 19 - Adaptação da heurística ao problema da Amb3e

Na situação apresentada, um veículo com capacidade para recolher resíduos de 12 pontos electrão por rota tem de recolher, em 5 locais distintos, resíduos de 21 pontos electrão. Na primeira rota, iniciada no depósito, o veículo passa no local D, onde recolhe cinco pontos electrão. Em seguida, dirige-se ao local E, onde recolhe três pontos electrão, e posteriormente ao local C, onde existem cinco pontos electrão; contudo, o veículo já só tem capacidade para recolher mais quatro, logo, como chegou ao limite da sua capacidade, regressa ao depósito, deixando por recolher cinco pontos electrão nos locais A e B e um ponto electrão no local C. Na rota 2 é feita a recolha dos restantes 11 pontos electrão, incluindo o ponto electrão do local C que ficou por recolher na primeira rota.

A grande vantagem desta abordagem é que a capacidade do veículo é aproveitada ao máximo em todas as rotas, podendo a excepção ser a última rota, no caso de não “restarem” pontos electrão suficientes para o fazer.

Foi colocada também a possibilidade de, uma vez que previamente se tinha conhecimento de que o veículo não iria conseguir recolher todos os pontos electrão no último ponto, este não se dirigir a esse último ponto, mas antes a um próximo, a

uma menor distância e com um número de pontos electrão que não ultrapassasse a capacidade do veículo. Esta solução tinha algumas vantagens em relação à anterior, entre elas o facto de não ser necessário visitar duas vezes o mesmo ponto, mas também tinha desvantagens, como por exemplo, existir o risco de, no limite, nunca se atingir a capacidade máxima do veículo e com isso obrigar a que a solução final tivesse um maior número de rotas. Após a análise das vantagens e desvantagens das duas abordagens, optou-se por implementar a primeira solução descrita.

4.5 Custos de Recolha

Depois de definidos todos os pontos da heurística de cálculo de rotas, foi necessário complementar o algoritmo com os custos associados à recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos. Nesta fase da modelação, tendo por base a informação disponibilizada pela Amb3e, foram identificados os seguintes custos:

- Custo fixo de saída do veículo do depósito;
- Custo fixo de recolha de cada ponto electrão.
- Custo de cada quilómetro percorrido pelo veículo (€/Km);

Os custos fixos de saída do veículo do depósito e de recolha de cada ponto electrão variam consoante o operador logístico, o que implica que este tenha de ser um valor configurável aquando do cálculo de uma determinada solução. Assim, na aplicação de cálculo de rotas que será apresentada mais à frente neste trabalho, foram incluídos dois campos que podem ser configuráveis em cada cálculo. No entanto, foram assumidos alguns valores base para estes mesmos campos.

No caso do custo de saída do veículo assumiu-se como *default* o valor de 50€ por cada rota. Este é um valor definido através de uma estimativa grosseira, uma vez que não tínhamos qualquer tipo de indicação dos valores praticados pelos operadores logísticos. Relativamente ao custo de recolha de cada ponto electrão (custo de carregamento dos resíduos no camião) foi, igualmente, assumido um valor grosseiro de 15€ por ponto electrão.

O custo por cada quilómetro percorrido pelo veículo é igualmente configurável na aplicação, embora este custo, normalmente, não deva variar significativamente de operador para operador, pois as frotas utilizadas na recolha são semelhantes. Ao contrário do custo de saída do veículo e do custo de recolha de um ponto electrão, o custo por quilómetro não é sempre fixo, podendo variar diariamente devido a diversos factores. Analisando os dados fornecidos pela Amb3e, foram identificados como factores de variação mais relevantes no cálculo dos custos por quilómetro, os seguintes:

1. Preço médio dos combustíveis (€/litro);
2. Consumo médio do veículo (litros/100Km);
3. Custo médio de cada recurso humano por quilómetro (€/Km);
4. Custo médio da manutenção do veículo por quilómetro (€/Km);

Conjugando todos estes factores, chegou-se à seguinte fórmula de cálculo:

$$CKM = \left(\frac{PCL * CV}{100} \right) + (CRH * NR) + CMV$$

Expressão 3 - Fórmula geral de custo por quilómetro

Sendo:

- CKM o valor do custo por quilómetro percorrido;
- PCL o preço do combustível por litro;
- CV o consumo médio do veículo por cada 100km;
- CRH o custo por quilómetro de cada recurso humano;
- NR o número de recursos humanos;
- CMV o custo médio de manutenção de um veículo por quilómetro.

Esta fórmula é bastante geral, existindo ainda sub-fórmulas que permitem chegar aos valores intermédios dos parâmetros anteriormente referidos, mas que por razões de confidencialidade de dados e por não se apresentarem como fundamentais para a descrição do trabalho realizado, não são aqui referidas.

Da conjugação dos custos descritos anteriormente resultou a seguinte fórmula final de cálculo do custo de cada rota de recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos:

$$\text{Custo Rota} = \text{CSV} + (\text{CKM} * D) + (\text{NPR} * \text{CRP})$$

Expressão 4 - Fórmula geral de cálculo do custo por rota

Sendo:

- CSV o custo de saída do veículo;
- CKM o custo por quilómetro do veículo;
- D a distância percorrida por rota;
- NPR o número de pontos electrão recolhidos por Rota;
- CRP o custo de recolha de um ponto electrão.

4.6 A Aplicação

Após reunir toda a informação necessária numa base de dados e modelar o problema de roteamento de veículos com restrições de capacidade adaptado ao problema de recolha de resíduos da Amb3e, passou-se à implementação da ferramenta propriamente dita. Esta implementação foi feita utilizando um paradigma de programação por objectos, mais precisamente a linguagem Java. Optou-se por esta linguagem, tal como no caso do motor de base de dados *MySQL*, por não implicar custos com licenças de *software* para a Amb3e. Esta linguagem tem também a vantagem de estar bastante desenvolvida e existirem imensas API's interessantes que podiam facilitar a implementação. Um bom exemplo dessas API's é a *framework Google Web Toolkit* descrita anteriormente.

Foram implementadas todas as rotinas de carregamento de dados para alimentar a aplicação, bem como todas as componentes do algoritmo de cálculo de rotas e respectivos custos. Estas rotinas foram ligadas a um interface gráfico criado usando *Swing*, um *Graphical User Interface* (GUI) do Java (*Web Swing*). O resultado final

foi um ecrã onde, dados alguns *inputs* necessários para o algoritmo de cálculo, este devolve as rotas com os pontos organizados por ordem de visita e os respectivos custos associados a cada rota (Figura 20).

Codigo	Nome	Morada	Numero PE
5	Feiriper	R. 5 de Outubro...	2
24	Forum Aveiro	Rua Batalhão ...	6
42	Atlantic Park Ov...	EN 109 - loja L...	1
44	Aveiro Retail P...	Aveiro Retail Pa...	1
56	CC Glicínias	Rua D. Manuel ...	3
64	Universidade A...	Campus Univer...	3
85	Escola Superio...	Rua Comanda...	1
98	CC Dolce Vita ...	Avenida D. Man...	2
142	AHBV Arouca	Rua dos Bomb...	1

Figura 20 - Aplicação de cálculo de rotas e respectivos custos

Como dados de entrada (*input*) da aplicação, é necessário que o utilizador defina:

- A lista de pontos a visitar por distrito ou cidade;
- O operador logístico responsável pela recolha;
- A capacidade do veículo usado na recolha (assume-se por *default* 12 pontos electrão, pois é aproximadamente a capacidade dos veículos normalmente utilizados na recolha);
- Os custos associados à recolha;

Como dados de saída (*output*), a aplicação retorna:

- O número de rotas de recolha;

- As diferentes rotas organizadas por ordem de visita e os respectivos custos associados.

Este modelo gráfico da aplicação foi melhorado aquando da integração de todos os módulos que deram origem ao sistema de suporte à decisão final. Os melhoramentos passaram por uma melhor organização da informação no ecrã e pela integração da aplicação com o *Google Maps*, para ter uma melhor percepção dos pontos de recolha no mapa, bem como das rotas calculadas para esses pontos. O resultado obtido com esses melhoramentos pode ser visualizado na Figura 21.

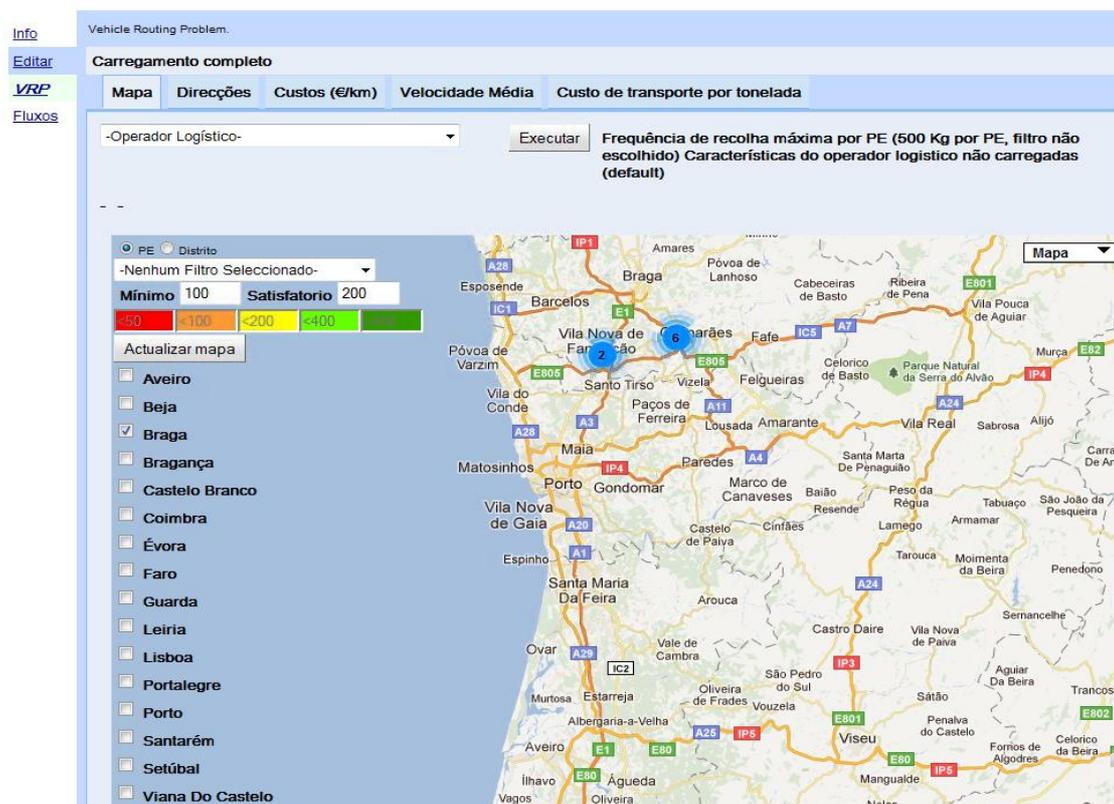


Figura 21 - Modelo gráfico da aplicação integrada com *Google Maps*

5. Resultados Alcançados

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos após a modelação e implementação de todos os algoritmos/métodos necessários para o cálculo de rotas de recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos, assim como do cálculo dos respectivos custos. Nesta demonstração de resultados foram usados os dados disponibilizados pela Amb3e e cuja última actualização foi feita no ano de 2010. Por uma questão de confidencialidade, alguns destes dados foram editados para aqui poderem ser apresentados.

Como referido anteriormente, os resultados apresentados vão ter por base a recolha de resíduos EEE nos distritos de Braga e Porto. Assim, os dados de entrada são os pontos electrão destes distritos e os respectivos operadores logísticos responsáveis pela recolha, bem como um conjunto de parâmetros relacionados com os custos de cada rota. De seguida são apresentados os cálculos desses parâmetros de *input*:

- Capacidade máxima do veículo (12 pontos electrão);
- Custo de saída do veículo do depósito (50€/Rota);
- Custo de recolha de cada ponto electrão (15€/Ponto Electrão);
- Custo por quilómetro percorrido (aproximadamente 1.28€/km);

Tal como referido anteriormente, no custo de saída do veículo do depósito e no custo de recolha de cada ponto electrão, foram definidos valores estimados de forma grosseira, visto não existir qualquer indicação sobre quais os valores praticados pelos operadores logísticos. A capacidade máxima foi definida como sendo, aproximadamente, 12 pontos electrões, pois é esta a capacidade dos veículos normalmente utilizados na recolha.

O custo por quilómetro foi obtido aplicando a Expressão 3 apresentada anteriormente e tendo como base para essa equação os seguintes valores:

1. Preço dos combustíveis, usando o valor médio de referência do gasóleo em Portugal (Web Mais Gasolina) (1.328€/litro);

2. Consumo médio dos veículos normalmente usados na recolha (*Web RoadTransport*) (19.8 litros/100km);
3. Custo médio, por quilómetro, de cada recurso humano usado na recolha (0.0403€)
4. Número de recursos humanos, normalmente, usados na recolha (um motorista e um ajudante) (2 recursos humanos);
5. Custo médio de manutenção dos veículos por quilómetro (0.934€);

Os valores 3 e 5 foram calculados empregando fórmulas de uma folha de cálculo disponibilizada pela Amb3e e usando valores estimados de entrada nessas mesmas fórmulas. Tal como referido anteriormente, por uma questão de confidencialidade, e uma vez que estas fórmulas não são relevantes para relatar o problema em questão, estas não são apresentadas neste documento.

Numa primeira fase calculou-se a matriz de distâncias entre todos os pontos da rede, usando as rotinas de ligação ao *Google Maps* anteriormente descritas. Após a finalização desse cálculo e sua inclusão na base de dados, foi apenas necessário carregar para a aplicação as distâncias entre os pontos sobre os quais iria recair o cálculo das rotas de recolha. Assim, e uma vez que estão a ser apresentados resultados de dois distritos diferentes, os cálculos das rotas em Braga e no Porto serão independentes, pois a recolha é feita por operadores logísticos distintos.

No caso do distrito de Braga é carregada uma matriz de distâncias (Tabela 1) que possui 72 registos, sendo esse valor obtido através da multiplicação de 9, valor que reflecte o número total de pontos no distrito de Braga (8 locais de recolha mais o Centro de Recolha), por 8, o número total de pontos menos 1 (a distância de um ponto a ele próprio é sempre 0).

PontoOrigem	PontoDestino	Distância
4	8	25.412
4	34	29.069
4	41	5.247
4	46	22.244
4	71	22.577
4	75	25.187
4	13	22.295
8	3	27.923
8	4	26.310
8	34	14.577
8	41	22.191
8	46	30.498
8	71	30.831
8	75	33.441

sQuery time: 0.174s Record 12 of 72

Tabela 1 - Matriz de distâncias dos pontos do distrito de Braga

Para aplicar os algoritmos aos pontos do distrito do Porto, é carregada uma matriz de distâncias que possui 420 entradas. Tal como anteriormente foi descrito, esse valor foi obtido através da multiplicação de 21, valor que reflecte o número total de pontos no distrito do Porto (20 locais de recolha mais o Centro de Recolha), por 20, o número total de pontos menos 1 (a distância de um ponto a ele próprio é sempre 0).

PontoOrigem	PontoDestino	Distância
37	79	32.915
37	90	10.895
37	92	4.637
37	105	3.168
37	106	6.278
37	107	10.775
37	108	8.928
37	109	14.821
37	110	8.461
37	111	36.371
37	112	11.565
37	113	10.901
37	5	42.028
48	37	6.259

sQuery time: 0.189s Record 13 of 420

Tabela 2 - Matriz de distâncias dos pontos do distrito do Porto

O carregamento da matriz de distância da base de dados para a aplicação é feito no momento em que o utilizador “invoca” o cálculo de rotas, sendo que nesse momento já foram definidos os pontos sobre os quais vai recair o cálculo de rotas.

Após estarem definidos todos os dados de *input*, a aplicação está em condições de aplicar o algoritmo construtivo do vizinho mais próximo, assim como todas as fórmulas de cálculo dos custos associados a uma determinada rota de recolha.

Assim, no distrito de Braga, aplicando os métodos de cálculo de rotas e custos aos oito pontos de recolha que perfazem um total de 17 pontos electrão, com os custos associados de recolha acima definidos, obtêm-se os resultados a seguir apresentados (Figura 22).

Figura 22 - Rotas e custo de recolha no Distrito de Braga

Foram então calculados dois percursos para a recolha dos 17 pontos electrão, perfazendo um total de 136,7 quilómetros. No primeiro percurso, o veículo pode

atingir a sua capacidade máxima recolhendo resíduos de 12 pontos electrão, em seis localizações distintas, percorrendo para isso um total de 77,52 quilómetros, sendo o custo total associado a esta rota de aproximadamente 269,23€. Na segunda rota, seriam recolhidos os restantes cinco pontos electrão dos dois locais de recolha em falta, percorrendo aproximadamente 59,18 quilómetros, com um custo associado de cerca de 185,75€. Na versão da aplicação com interacção com o *Google Maps* são mais perceptíveis as rotas calculadas para a recolha no distrito de Braga (Figura 23).

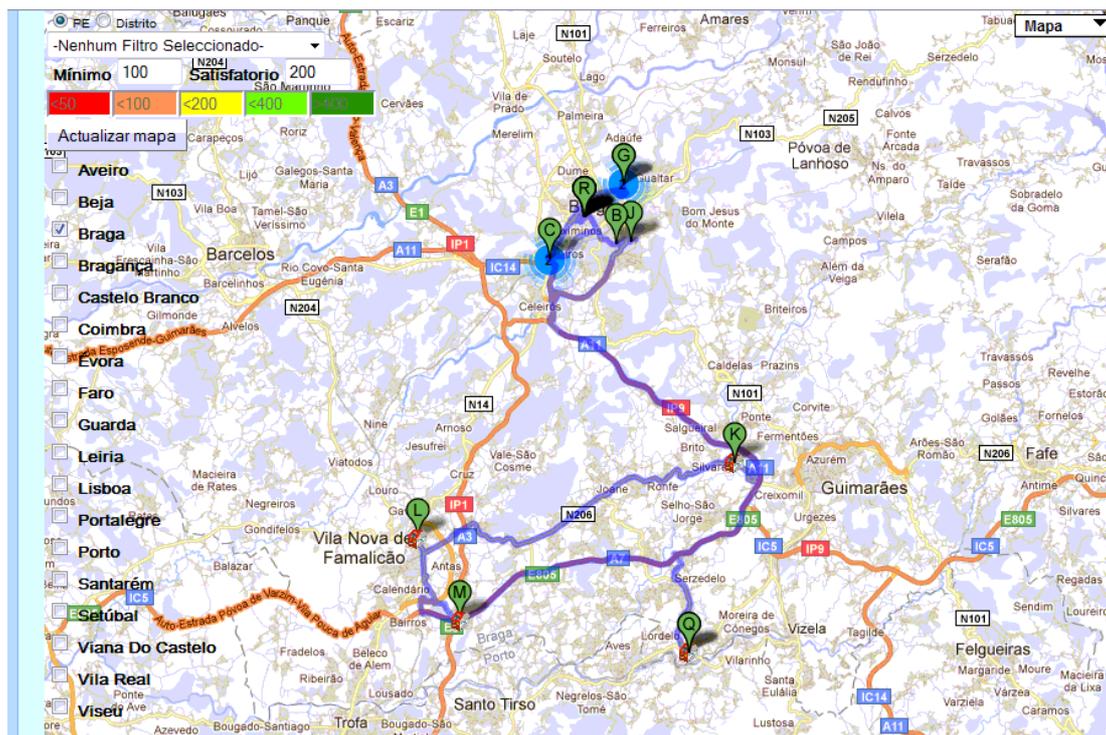


Figura 23 - Rotas de recolha no Distrito de Braga

No mapa, as rotas de recolha aparecem a cores diferentes. A linha azul representa o primeiro percurso e a roxa o segundo. O ponto R representa a localização do operador logístico, enquanto os restantes pontos retratam os locais onde será processada a recolha dos resíduos.

A estimativa do custo total de recolha dos pontos electrão no distrito de Braga ronda assim os 454.98€. De realçar que este é um valor fictício, uma vez que os custos associados à recolha, utilizados como entrada da aplicação, são irrealis.

No caso do Distrito do Porto, existem 36 pontos electrão, num total de 20 pontos de recolha distintos. A aplicação do cálculo de rotas através do método do vizinho mais próximo, assim como das rotinas de cálculo dos custos associados retorna os resultados a seguir apresentados (Figura 24).

Cálculo de Rotas

Pontos Electrão

Distrito:

Concelho:

Codigo	Nome	Morada	Numero PE
37	Campus S. João	Porto	1
48	Estádio do Dragão, Po	Via Futebol Clube do P.	2
53	Carvalhos	Rua da Presa Seca, 3.	1
54	VN Gaia	Rua Camilo Castelo B.	1
59	Gaia Shopping	GaiaShopping, Avenid.	6
60	Norteshopping	NorteShopping, Rua S.	6
67	CC Parque Nascente	Praceta Parque Nasce.	3
70	CC Continente Gaia	Avenida dos Escultore...	2
79	City Park Penafiel	Quinta da Lagarteira -	1
90	IKEA MAR Shopping	Av. Dr. Oscar Lopes, L.	2
92	CC Dolce Vita Porto	Rua dos Campeões E.	2

Operador Logístico

Operador Logístico:

Morada Operador Logístico:

Capacidade Veículos: (Pontos Electrão)

Custo Saída: (euros)

Custo Recolha PE: (euros)

Custo por Quilometro: (euros)

Rotas e custos:

Número de Rotas de Recolha: 3.0
Número de Pontos Electrão a recolher: 36

Rota 1:
CR5 -> PE79(1) -> PE112(1) -> PE67(3) -> PE92(2) -> PE48(2) -> PE105(1) -> PE37(1) -> PE60(1) -> CR5
'CSV + (CKM * D) + (NPR * CRP) = Custo Rota'
50.0€ + (1.28€ x 115.267) + (12 x 15.0€) = 347.542€

Rota 2:
CR5 -> PE108(1) -> PE107(1) -> PE60(5) -> PE110(1) -> PE90(2) -> PE106(1) -> PE70(1) -> CR5
'CSV + (CKM * D) + (NPR * CRP) = Custo Rota'
50.0€ + (1.28€ x 128.730) + (12 x 15.0€) = 349.774€

Rota 3:
CR5 -> PE70(1) -> PE59(6) -> PE113(1) -> PE109(1) -> PE54(1) -> PE53(1) -> PE111(1) -> CR5
'CSV + (CKM * D) + (NPR * CRP) = Custo Rota'
50.0€ + (1.28€ x 188.712) + (12 x 15.0€) = 426.551€

Custo Total: 1123.868 €

Figura 24 - Rotas e custo de recolha no Distrito do Porto

Para a recolha dos resíduos dos 36 pontos electrão distribuídos por 20 locais de recolha foram calculados três percursos, num total de 432,72 quilómetros. No primeiro percurso, o veículo recolhe os resíduos de 8 locais, perfazendo um total de 12 pontos electrão, atingindo assim a sua capacidade máxima e percorrendo 115,27 quilómetros com um custo de 347.54€. Neste percurso, o veículo apenas conseguiu recolher, no último ponto, um dos 6 pontos electrão disponíveis, ficando assim por recolher cinco pontos electrão que foram “encaixados” no segundo percurso calculado.

O segundo percurso inclui ainda a passagem por mais seis locais, num total de 128.73 quilómetros percorridos. O custo da segunda rota será de aproximadamente 349.77€. No terceiro e último percurso serão recolhidos 12 pontos electrão, sendo mais uma vez utilizada a capacidade máxima do veículo.

O último percurso custará cerca de 426.55€ e será percorrida uma distância de aproximadamente 188,71 quilómetros.

Na Figura 25 podem observar-se algumas das rotas de recolha no distrito do Porto, sendo que o ponto Y representa o operador logístico responsável pela recolha.

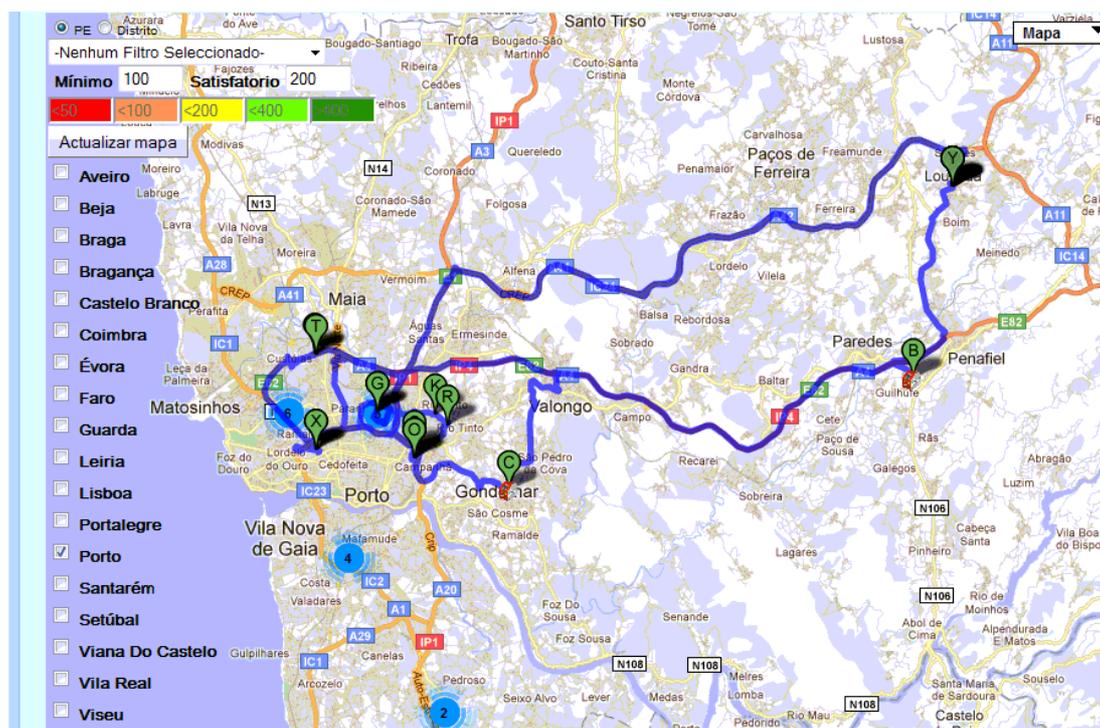


Figura 25 - Rotas de recolha no Distrito do Porto

A estimativa do custo total de recolha dos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos no distrito do Porto ronda, então, os 1123,87€. Realça-se novamente que este é um valor fictício, pois os custos associados à recolha, utilizados como entrada da aplicação, são irreais.

Apresentados que estão os resultados alcançados, pode concluir-se que o objectivo de construir um sistema de apoio à decisão para facilitar e otimizar o cálculo de rotas para a recolha de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos e dos seus respectivos custos foi assim atingido. Este objectivo resultou numa aplicação que, dados alguns *inputs* definidos pelo utilizador, retorna resultados aproximados da realidade, fornecendo assim à Amb3e um suporte para as negociações dos contractos

com os operadores logísticos. De salientar que a qualidade dos resultados que a aplicação oferece está dependente da qualidade dos dados que “alimentam” a mesma. Assim, é fundamental que os dados relativos à localização dos pontos de recolha e dos operadores logísticos sejam o mais precisos possível, pois só assim se consegue assegurar a exactidão do cálculo das distâncias entre os pontos. É igualmente importante que os custos definidos como entrada do modelo sejam o mais precisos possível, pois só assim se pode assegurar que os custos associados às rotas são aproximados dos custos de recolha na realidade.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

O desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão para a construção de rotas de recolha de REEE e cálculo dos respectivos custos, proporcionando à Amb3e valores base para as negociações dos contratos com os operadores logísticos era o grande objectivo deste trabalho. Pode então afirmar-se que esse objectivo foi alcançado.

Um dos pontos fundamentais deste trabalho era a organização de toda a informação relevante para o problema num sistema central que possibilitasse um acesso fácil e rápido à mesma. Para resolver este problema, toda a informação considerada relevante foi recolhida, filtrada e tratada de forma a poder ser “importada” para um modelo de base de dados que foi construído para o efeito. A maior dificuldade neste ponto prendeu-se com a análise de grandes volumes de informação e a consequente decisão sobre a sua relevância para o problema em questão. Após ser tomada essa decisão, o tratamento da mesma ficou mais simplificado.

Outro dos pontos importantes deste trabalho foi a construção de uma matriz que permitisse saber as distâncias reais entre todos os pontos da rede. Aqui surgiram algumas dificuldades relacionadas com a morosidade de todo o processo de cálculo, em grande parte causada por restrições de acesso impostas pela ferramenta *Google Maps*.

O sistema de suporte à decisão ficou completo com a implementação em código dos algoritmos de cálculo de rotas e de cálculo dos custos modelados ao longo do processo de análise e desenho da solução.

Na implementação destes processos foram utilizadas diferentes tecnologias. Como motor de base de dados foi utilizado o *MySQL*. Para a implementação dos diferentes algoritmos e rotinas de tratamento de dados foi utilizada a linguagem de programação por objectos *Java*. Foi ainda utilizada a *framework Google Web Toolkit* para o cálculo das distâncias entre pontos e interacção da aplicação com o *Google Maps*. O

ponto comum entre estas tecnologias é que são todas gratuitas, não acarretando assim custos extra para a Amb3e.

Da realização deste trabalho ficou ainda patente a importância da optimização no sucesso de um negócio onde pequenos ajustes se podem traduzir em ganhos significativos.

As ideias e opiniões dos diferentes autores analisados ao longo do trabalho foram essenciais para a definição do procedimento algorítmico. Limitações temporais não permitiram implementar todas essas ideias que foram surgindo, por isso são aqui identificados alguns dos pontos que podem ser aperfeiçoados no futuro para melhorar e otimizar este sistema de suporte à decisão:

- Foi assumido como pressuposto deste projecto que, no momento da recolha, todos os pontos electrão se encontram no limite da sua capacidade. Esta foi uma opção conservadora, como tal, a sugestão para melhorias futuras passa pela utilização de técnicas de previsão baseadas em dados históricos sobre as recolhas em cada ponto electrão, bem como de outra informação relevante, como seja: as alterações na rede ponto electrão ao longo do tempo, nomeadamente, a sua expansão e as campanhas publicitárias que são feitas periodicamente e que têm um forte impacto nas quantidades recolhidas. Desta forma, poder-se-iam melhorar as estimativas do nível de enchimento de cada um dos pontos electrão no momento da recolha;
- Foi aplicada a heurística construtiva do vizinho mais próximo ao problema de roteamento de veículos com restrições de capacidade. Este algoritmo de cálculo de rotas pode ser melhorado de forma a otimizar o seu resultado final. Uma das opções é a introdução do método meta-heurístico Algoritmos Genéticos, que pode ser “corridos” sobre uma solução inicial gerada pela heurística do vizinho mais próximo, de forma a gerar uma solução final com custos mais reduzidos. Este melhoramento aumentará, em grande parte dos casos, a eficácia do algoritmo, mas aumentará também a sua complexidade de implementação.

7. Referências

7.1 Referências Bibliográficas

Baker, B. M., & Ayechev, M. A. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 30, 787-800.

Barker, N. (2009). *Developing Vehicle Routing and Outbound Fulfillment Systems for an e-grocery Company*. Dissertação de Mestrado (M.B.A.), MIT Sloan School of Management, Department of Mechanical Engineering, in conjunction with the Leaders for Manufacturing Program at MIT, Massachusetts, EUA.

Barroso, A. P., & Machado, V. H. (2005). A Gestão logística dos Resíduos em Portugal, *Investigação Operacional*, 25, 179-194.

Carvalho, M. S. (2006). *Sebenta de Logística*. Braga: Universidade do Minho, Departamento de Produção e Sistemas.

Clarke, G., & Wright, J. V. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568-581.

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 7, 80-91.

Falkenauer, E. (1996). A hybrid grouping genetic algorithm for bin packing. *Journal of Heuristics*, 2, 5-30.

Fernández, E., Kalcsics, J., Nickel, S., & Ríos-Mercado, R. Z. (2010). A novel maximum dispersion territory design model arising in the implementation of the WEEE-directive. *Journal of the Operational Research Society*, 61, 503-514.

Fisher, M. (1995). Vehicle routing. *Handbooks of Operations Research and Management Science*, 1, 8, 1-31.

Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A Characterization of Logistics Networks for product Recovery, OMEGA. *The International Journal of Management Science*, 28-6, 653-666.

Gendreau, M., Laporte, G., & Potvin, J-Y. (2002). Metaheuristics for the capacitated VRP. *The Vehicle Routing Problem*, 6, 140-144.

Hischier, R., Wager, P., & Gaughhofer, J. (2005). Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environment impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), 525-539.

Holland, J. H. (1994). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge: A Bradford Book.

Jünger, M., Reinelt, G., & Rinaldi, G. (1995). The travelling salesman problem. *Handbooks of Operations Research and Management Science*, 4, 7, 225-330.

Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 3, 345-358.

Mendes, J. J. (2003). *Sistema de Apoio à Decisão para Planeamento de Sistemas de Produção Tipo Projecto*. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Mitchell, M. (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MIT.

Murphy, P. R., Poist, R. F., & Braunschweig, C. D. (1996). Green Logistics: comparative views of environmental progressives, moderates, and conservatives. *Journal of Business Logistics*, 17, 1, pp. 191-211.

Oliveira, J. A. (Não publicado). *Apontamentos de Métodos Heurísticos*. Braga: Universidade do Minho, Departamento de Produção e Sistemas.

Potvin, J-Y. (1996). Genetic algorithms for the traveling salesman problem. *Annals of Operations Research*, 63, 339-370.

Ribeiro, A. R. (2009). *Caracterização de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) por categorias legais: Caso de estudo Amb3E*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Portugal.

Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (1999). Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. *Reverse Logistics Executive Council*, Reno, NV.

Salema, M. I. G. (2007). *Design and planning of closed-loop supply chains*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Toth, P., & Vigo, D. (2002). An Overview of vehicle routing problems. *The Vehicle Routing Problem*, 1, 1-23.

Turner, M., & Callaghan, D. (2007). UK to finally implement the WEEE directive. *Computers and Operations Research*, 36(3), 755-776.

Wu, H., & Dunn, S. C. (1994). Environmentally Responsible Logistics Systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25, 2, 20-38.

7.1 Referências Web

(Web Amb3E) “Amb3e”, <http://www.amb3e.pt/>

(Web b-on) “b-on – Biblioteca do Conhecimento”, <http://www.b-on.pt/>

(Web Corning)

http://www.corning.com/about_us/corporate_citizenship/weee/customer/custch.aspx -

Acedido em 18 de Janeiro de 2011

(Web Google Scholar) “Google Académico”, <http://scholar.google.pt/>

(Web RepositóriUM) “RepositóriUM – Universidade do Minho”,

<http://repositorium.sdum.uminho.pt/>

(WEEE 2003) Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) – Joint declaration of the European parliament, the Council and the Commission relating to Article 9, [http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0096:EN:HTML)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0096:EN:HTML](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0096:EN:HTML) -

Acedido em 15 de Janeiro de 2011

(RevLog) “RevLog”, <http://www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/Introduction.htm> -

Acedido em 21 de Janeiro de 2011

(Web Porto) “Porto – Wikipedia, the free encyclopedia”,

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Porto>, Acedido em 8 de Outubro de 2011

(Web Braga) “Braga - Wikipedia, the free encyclopedia”,

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Braga>, Acedido em 8 de Outubro de 2011

(Web Haversine) “Haversine formula”,

http://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula, Acedido em 12 de Outubro de 2011

(Web Swing) “Swing Java – Wikipedia the free encyclopedia”,

[http://en.wikipedia.org/wiki/Swing_\(Java\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Swing_(Java)), Acedido em 15 de Outubro de 2011

(Web Mais Gasolina) “Mais Gasolina”

<http://www.maisgasolina.com>, Acedido em 15 de Outubro de 2011

(Web *RoadTransport*) “Road Transport”

<http://www.roadtransport.com/ModelDetails/12459/iveco-eurocargo.html>, Acedido em 15 de Outubro de 2011