



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Amaro Oliveira Ferreira

Optimização do Processo de
Recolha de Resíduos: Desenvolvimento de
Ferramentas de Investigação Operacional
para o Problema de Orientação de Equipas
com Multi-Restrições



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Amaro Oliveira Ferreira

Optimização do Processo de
Recolha de Resíduos: Desenvolvimento de
Ferramentas de Investigação Operacional
para o Problema de Orientação de Equipas
com Multi-Restrições

Tese de Doutoramento
Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor José António Vasconcelos Oliveira
Professor Doutor Manuel Carlos Barbosa Figueiredo

Agradecimentos

Em primeiro lugar um agradecimento especial aos meus orientadores, os Professores Doutores José António Vasconcelos Oliveira e Manuel Carlos Barbosa Figueiredo, por todo o conhecimento que partilharam comigo, pela motivação que me deram para atingir os objetivos que me propus alcançar, pelas sugestões e críticas construtivas, e ainda pela disponibilidade e paciência para me auxiliarem na resolução dos problemas que surgiram ao longo do meu projeto de investigação. Foi com enorme satisfação que trabalhei com eles neste projeto.

Aos Professores Doutores Anabela Tereso, Guilherme Pereira, Luís Dias, Maria do Sameiro Carvalho e José Valério de Carvalho, pelos ensinamentos que me transmitiram durante minha frequência do Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas.

Aos colegas Artur Quintas, Gabriel Mota, Mário Abreu e Celso Coutinho pelos seus contributos para o meu projeto de investigação ao longo das diferentes fases de desenvolvimento que o caracterizaram.

Agradeço também à empresa Braval, em especial ao diretor Dr. Pedro Machado por fornecer acesso a informação importante, sem a qual eu não poderia ter desenvolvido o caso de estudo em que se focou a investigação. Deixo também um agradecimento ao Denis Pereira pelo apoio prestado e por me inteirar de pormenores importantes da atividade da empresa.

Agradeço ainda à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo apoio financeiro concedido no âmbito do projeto PEst-OE/EEI/UI0319/2014, que tornou possível a realização deste projeto de doutoramento.

Em especial, agradeço aos meus pais Manuel Amaro e Maria de Fátima, que ao longo de toda a minha vida me proporcionaram sempre muito amor, transmitiram ótimos valores humanos e conselhos, além de tudo o resto que eu necessitasse para ser feliz. Agradeço à minha irmã Ana pelos seus conselhos e motivação que contribuíram para eu superar esta fase profissional da minha vida. Aos meus sogros e segundos pais, Zlatan e Nadya, agradeço todos os conselhos e partilha de experiências, bem como o todo o apoio, motivação e carinho. Por fim, mas não em último lugar, à minha querida esposa Zlati, por me fazer feliz todos os dias, por todo o amor, carinho, paciência, motivação, apoio e boa disposição que me proporciona, por ser quem é, por me inspirar, por acreditar sempre no meu valor e me lembrar disso quando mais preciso... a ela um especial agradecimento.

RESUMO

Nas últimas décadas, a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tornou-se uma atividade de elevada importância, pois o controlo eficaz da produção desses resíduos é essencial para a existência humana ser sustentável na era moderna. A reciclagem dos resíduos de embalagens domésticas (RED) contribui bastante para o controlo e redução da geração de RSU. A reciclagem dos RED é possível através da sua separação dos outros tipos de RSU e deposição em pontos específicos que em Portugal são denominados ecopontos e possuem três tipos de contentores: papelões, embalões e vidrões. A gestão do processo de recolha de RED é realizada por empresas especializadas. A gestão adequada do processo de recolha é fundamental para se efetuarem recolhas de forma eficaz e com o menor custo possível, gerindo vários recursos como veículos, ecopontos (e contentores), pessoas (condutores e ajudantes), e tempo disponível (turnos, prazos, etc.).

O foco de investigação desta tese de doutoramento incidiu no estudo do processo de recolha de resíduos, mais especificamente a recolha de RED para reciclagem. A recolha de dados e informação sobre este processo foi feita na empresa Braval que efetua recolha de RED em seis concelhos do distrito de Braga, em Portugal. No âmbito do processo de recolha de RED foi identificado um problema de encaminhamento de veículos (PEV) de grande complexidade. Desenvolveram-se ferramentas para a resolução do PEV com vista à otimização do processo de recolha de RED, as quais permitem efetuar: 1) a previsão do estado de enchimento dos contentores de ecopontos e determinação do ritmo a que se depositam resíduos nos contentores; 2) a otimização das rotas de recolha; 3) o agendamento de rotas e de contentores a recolher; 4) a aplicação de métodos de análise de decisão multi-critério (ADMC) para identificar soluções adequadas quando se alteram objetivos e é necessário cumprir certos critérios.

As metodologias adoptadas para se efetuar a previsão da geração de RED foram os métodos de regressão linear e de redes neuronais artificiais. Foram propostos vários fatores com potencial para explicar a geração de RED. Com base nesses fatores e nas metodologias adoptadas, foram desenvolvidos modelos que permitem prever o número de recolhas anuais e mensais a efetuar para cada contentor de cada ecoponto. As experiências realizadas permitiram construir modelos capazes de prever as recolhas mensais e anuais para papelões, embalões e vidrões com elevada precisão. Foi também possível caracterizar os fatores mais contributivos para a geração RED.

Na tarefa de otimização de rotas desenvolveram-se modelos específicos para caracterizar o PEV identificado, partindo do modelo geral do problema de orientação de equipas, (TOP, *team*

orienteering problem). Desenvolveram-se quatro novos modelos com base no TOP que não constavam na literatura. Para resolver os modelos do TOP e de outras variantes, foram desenvolvidos algoritmos genéticos do tipo geracional e celular. Foram realizadas experiências e avaliou-se o desempenho em instâncias de teste públicas do TOP, e das variantes TOPTW e CTOP. Os AG alcançaram resultados competitivos comparando com outros métodos do atual estado da arte em termos de qualidade de solução e rapidez de cálculo. Obtiveram-se valores superiores aos máximos conhecidos na literatura para sete instâncias públicas do TOP e para uma do CTOP. De um modo geral, os AG celulares apresentaram um desempenho superior aos AG geracionais nos testes realizados.

Desenvolveu-se um método de agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento dos contentores, em que se estabelecem prioridades para o nível de urgência de recolha de cada contentor. O método de agendamento foi testado com dados reais da empresa Braval, e os resultados apontam para uma possível redução significativa das distâncias percorridas, antevendo reduções promissoras no consumo de combustível. Também se averiguou que para o mesmo período de agendamento, e considerando as reduções nos custos operacionais, é possível recolher mais papelões e vidrões, mantendo-se o mesmo número de embalões.

A implementação do módulo de ADMC para o sistema de apoio à decisão foi executada com recurso ao *software* beSmart, o qual inclui métodos como o SMART, AHP e ValueFn. A utilização do beSmart e a aplicação dos métodos de ADMC a problemas reais de recolha de RED permitiu validar a sua utilidade utilizando os dados da empresa Braval.

As ferramentas desenvolvidas nesta investigação permitem dar resposta a diferentes problemas que condicionam a otimização do processo de recolha de RED, e juntas constituem um sistema de apoio à decisão.

Palavras-chave: Gestão da Recolha de Resíduos, Problema de Encaminhamento de Veículos, Problema de Orientação de Equipas, Otimização de Rotas, Previsão da Geração de Resíduos, Análise de Decisão Multi-Critério, Logística, Algoritmos Genéticos, Regressão Linear, Redes Neurais Artificiais.

ABSTRACT

In the last decades, the management of municipal solid waste (MSW) became an activity of high importance, since an effective control over waste production is essential to enable a sustainable human existence in the modern age. The recycling of household packaging waste (HPW) greatly accounts for control and reduction of MSW generation. The recycling of HPW is possible due to its previous separation from other waste streams within MSW, and further depositing in specific collection points that in Portugal are called *ecopontos*, which usually include three types of containers: *papelões* (for paper and cardboard), *embalões* (for plastic and metal) and *vidrões* (for glass). The management of the HPW collection process is performed by specialized companies. An adequate and efficient management of the HPW collection process is crucial in order to perform effective collections with the lowest cost possible, managing several resources such as vehicles, *ecopontos* (and containers), people (drivers and helpers), and the time available (work shifts, deadlines, schedules, etc.).

The research focus of this doctoral thesis was on studying the waste collection process, more specifically the collection of HPW for recycling. Information and data about this process was obtained from *Braval*, a company that collects HPW in six municipalities that belong to the district of Braga, in Portugal. Within the scope of the HPW collection process, a vehicle routing problem (VRP) of great complexity was identified. In order to solve the identified VRP while aiming to optimize the HPW collection process, the following tools were developed: 1) a forecasting method to predict the filling level of the containers at each *ecoponto* and to determine the filling rate of each container; 2) a route optimization algorithm able to handle several variations of the VRP; 3) a scheduling method for HPW collections; 4) a multi-criteria decision analysis (MCDA) module based on specific software that embeds MCDA methods that are used to identify proper solutions when objectives change and certain criteria must be met.

Regarding the methodologies used to forecast HPW generation, two methods were employed: linear regression and artificial neural networks. Several factors with potential to explain HPW generation were proposed. Based on those factors and the adopted methodologies, forecasting models were developed to predict the number of yearly and monthly collections for each container of each *ecoponto*. The performed experiments enabled the construction of models capable of predicting yearly and monthly collections for all types of container with high level of accuracy. In addition, the experiments revealed which factors have most impact on waste filling rates.

For the route optimization task, specific models were developed to describe and translate the identified VRP, starting from the general model of the team orienteering problem (TOP). Based on the TOP, four new models were developed that do not appear in the literature. In order to solve the models of the TOP and other variants, genetic algorithms of generational and cellular types were developed and applied. The performance of the genetic algorithms (GA) developed for route optimization was assessed based on tests with publicly available instances of the TOP and other variants, namely the TOPTW and CTOP. The GA achieved competitive results when compared to others state-of-art methods in terms of solution quality and processing speed. The GA were able to set new best solutions for seven TOP instances, and one new best solution for a CTOP instance. Overall, in the performed tests, the cellular GA obtained a superior performance against the generational GA.

A method was developed for the scheduling of HPW collections based on the filling rate of containers, where priorities are established for the levels of collection urgency. The scheduling method was tested with real data provided by *Braval*, and the results point to a possible significant reduction in travelled distances, anticipating promising reductions in fuel costs. Additionally, it was observed that for the same scheduling period, and considering the foreseen reduction in operational costs, it is possible to collect more *papelão* and *vidrão* containers, and equal number of *embalão* containers.

The implementation of the ADMC module for the decision support system was done using software called beSmart, which includes methods such as SMART, AHP and ValueFn. The application of beSmart software and ADMC methods to real situations of HPW collection supported the validation of their usefulness using data from *Braval*.

The tools developed in this research address different problems that affect the optimization of the HPW collection process, and all together compose a decision support system.

Keywords: Waste Collection Management, Vehicle Routing Problem, Team Orienteering Problem, Route Optimization, Waste Generation Forecasting, Multi-Criteria Decision Analysis, Logistics, Genetic Algorithms, Linear Regression, Artificial Neural Networks.

Índice

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Oportunidade de investigação e motivação.....	1
1.2 Enquadramento.....	3
1.3 Objetivos e Contributos.....	4
1.4 Estrutura do documento	5
CAPÍTULO II	7
RECOLHA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UM PROBLEMA REAL	7
2.1 Resíduos sólidos urbanos e reciclagem	7
2.1.1 Hierarquia da gestão de resíduos	8
2.1.2 Reciclagem e a política dos 3 R's	9
2.1.3 O conceito de reciclagem	10
2.1.4 Efeitos da reciclagem e críticas à sua ação.....	11
2.1.5 Resíduos de embalagens domésticas	12
2.2 Gestão do processo de recolha de resíduos de embalagens domésticas	13
2.3 Otimização do processo de recolha seletiva de resíduos	14
2.3.1 Importância da otimização da recolha seletiva de resíduos	14
2.3.2 Modelação do processo de recolha seletiva de resíduos.....	15
2.3.3 Medidas a implementar para a otimização da recolha seletiva	16
2.4 Um Sistema de Apoio à Decisão para a Gestão do Processo de Recolha de Resíduos para Reciclagem.....	18
2.4.1 Componentes do sistema de apoio à decisão	18
2.4.2 Funcionamento geral do sistema.....	18
2.5 Caso de estudo: A empresa BRAVAL.....	19
CAPÍTULO III	23
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1 Otimização do encaminhamento de veículos	23
3.2 Encaminhamento de veículos no contexto da recolha de resíduos	27

3.3	Previsão da geração de resíduos.....	29
3.4	Análise de decisão multi-critério aplicada a problemas de encaminhamento de veículos	32
3.5	Conclusões.....	34
CAPÍTULO IV		37
FERRAMENTAS PARA A PREVISÃO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS		37
4.1	Modelação do problema	37
4.1.1	Classificação quanto ao tipo de modelo de previsão	39
4.1.2	Recolha de informação necessária aos modelos	41
4.1.3	Processamento dos dados	43
4.2	Metodologias adotadas	49
4.2.1	Modelos de regressão linear múltipla	50
4.2.2	Modelos de redes neuronais artificiais.....	50
4.3	Experiências para a previsão da geração de resíduos	53
4.3.1	Testes com modelos de regressão linear múltipla	55
4.3.2	Testes com modelos de redes neuronais artificiais	61
4.3.3	Comparação entre modelos de regressão linear múltipla e modelos de redes neuronais artificiais	66
4.3.4	Modelo de previsão híbrido	67
4.3.5	Fator de correção sazonal	68
4.3.6	Conclusões sobre os testes de previsão.....	71
CAPÍTULO V		73
FERRAMENTAS PARA A OTIMIZAÇÃO DE ROTAS.....		73
5.1	Modelação do problema	73
5.1.1	Os modelos TOP, TOPTW e TOPdTW.....	74
5.1.2	Os modelos CTOP, CTOPTW e CTOPdTW	78
5.1.3	Recolha Multi-Produto – Modelo CTOPTW-MPC	79
5.1.4	Frota Heterogénea – Modelo CTOPdTW-HF	80
5.2	Metodologias adotadas	81

5.2.1	Algoritmo Genético – Descrição geral	83
5.2.2	Aplicação de algoritmos genéticos ao TOP e à recolha de RED.....	87
5.3	Ferramentas de <i>software</i> desenvolvidas	88
5.3.1	Algoritmos Genéticos Geracionais.....	90
5.3.1.1	Algoritmo GATOP-1.....	90
5.3.1.2	Algoritmo GATOP-2.....	96
5.3.1.3	Algoritmo GATOP-3.....	102
5.3.2	Algoritmos Genéticos Celulares	108
5.4	Experiências com as ferramentas para otimização de rotas	114
5.4.1	Desempenho geral no TOP.....	115
5.4.2	Desempenho geral no TOPTW.....	124
5.4.3	Desempenho geral no CTOP	128
5.4.4	Conclusões sobre o desempenho geral das ferramentas desenvolvidas.....	130
CAPÍTULO VI		133
AGENDAMENTO DE ROTAS DE RECOLHA DE RESÍDUOS.....		133
6.1	Especificações do processo de recolha de resíduos no caso de estudo	133
6.2	Metodologia desenvolvida	138
6.2.1	Agrupamento de contentores em rotas por análise de aglomerados (clusters) 139	
6.2.2	Agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores em ecopontos	146
6.3	Avaliação do desempenho em situações reais de agendamento de rotas de recolha 167	
6.3.1	Considerações prévias	168
6.3.2	Agendamento de recolha de vidrões.....	173
6.3.3	Agendamento de recolha multi-produto: papelões e embalões	179
6.3.4	Agendamento de recolha de papelões	186
6.3.5	Agendamento de recolha de embalões	190
6.3.6	Considerações finais sobre os testes de agendamento.....	192

CAPÍTULO VII	199
ANÁLISE MULTI-CRITÉRIO NA GESTÃO DA RECOLHA DE RESÍDUOS	199
7.1 Importância da análise de decisão multi-critério no contexto da recolha de resíduos 199	
7.2 Diferentes objetivos para o encaminhamento de veículos	200
7.3 Critérios e indicadores de desempenho no contexto da recolha de resíduos para reciclagem	201
7.4 Metodologias adoptadas e ferramentas utilizadas	201
7.4.1 Descrição do <i>software</i> adotado e melhoramentos efetuados	201
7.4.2 Métodos ADMC utilizados.....	202
7.5 Processo de apoio à tomada de decisão	203
7.6 Experiências realizadas e conclusões	206
CAPÍTULO VIII	209
CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	209
8.1 Conclusões gerais	209
8.2 Contribuições científicas	214
8.3 Aplicações práticas.....	215
8.4 Dificuldades	216
8.5 Trabalho futuro.....	217
BIBLIOGRAFIA	219
ANEXOS	229
Anexos I	229
Anexos II	237
Anexos III	242
Anexos IV	245
Anexos V	250

Lista de Figuras

Figura 1 – Modelo pirâmide da hierarquia da gestão de resíduos.....	8
Figura 2 – Ecoponto com os contentores: embalão (amarelo), papelão (azul) e vidro (verde). - Fonte: braval.pt	13
Figura 3 – Esquema representativo do modo de funcionamento do SAD e dos seus módulos. .	19
Figura 4 – Identificação de elementos relacionados com os subfactores que caracterizam a área de influência de um ecoponto em termos socioeconómicos usando o SIG <i>Google Maps</i>	45
Figura 5 – Identificação de elementos relacionados com os subfactores que caracterizam a área de efeito de ecoponto em termos socioeconómicos usando o SIG <i>Google Earth</i>	45
Figura 6 – Análise da mancha habitacional para determinação do Fator Demográfico (FD). (imagem obtida via <i>Google Earth</i>).....	47
Figura 7 – Distribuição da variável RPA para os papelões.	48
Figura 8 – Distribuição da variável RPA para os embalões.	49
Figura 9 – Distribuição da variável RPA para os vidros.	49
Figura 10 – Esquema de um neurónio artificial.	51
Figura 11 – Esquema de um exemplo de rede neuronal MLP <i>feed-forward</i>	52
Figura 12 – Valores reais e valores previstos de RPAP para os dados de teste.	56
Figura 13 – Valores reais e valores previstos de RPAP para os dados de teste.	57
Figura 14 – Valores reais e valores previstos de RPAP para os dados de teste.	57
Figura 15 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPAP	60
Figura 16 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPAP	60
Figura 17 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPAP	60
Figura 18 – Valores reais e valores previstos de RPAP para os dados de teste.	64
Figura 19 – Valores reais e valores previstos de RPAP para os dados de teste.	64
Figura 20 – Valores reais e valores previstos de RPAP para os dados de teste.	64
Figura 21 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPAP	65
Figura 22 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPAP	65
Figura 23 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPAP	66
Figura 24 – Uma instância do TOP representada por um grafo de 8 vértices, com representação de um cromossoma e listas de prioridade para dois veículos.....	91

Figura 25 - Exemplo de uma solução possível para uma instância do TOP com base nas listas de prioridade de dois veículos.....	92
Figura 26 - Exemplo de funcionamento da operação de cruzamento.....	94
Figura 27 - Exemplo de funcionamento da mutação.....	95
Figura 28 - <i>Solution Viewer</i> da ferramenta GATOP-1.....	96
Figura 29 - Exemplo de inserção de vértice numa rota da solução.....	98
Figura 30 - O processo de cruzamento entre duas soluções (cromossomas descodificados).....	99
Figura 31 - Processo de mutação do tipo <i>single-swap</i> de uma solução (cromossoma descodificado).....	100
Figura 32 – Pormenor da interface gráfica do utilizador da ferramenta GATOP-2.....	101
Figura 33 – Exemplo de representação de um cromossoma no AG para o problema TOP seguindo um esquema de prioridades.....	103
Figura 34 - Exemplo de lista ordenada de vértices do mais prioritário para o menos prioritário.....	104
Figura 35 - Processo de construção de rotas no algoritmo genético da ferramenta GATOP-3. .	104
Figura 36 - Algoritmo construtivo: processo de inserção de vértices em rotas.....	105
Figura 37 - Exemplo de uma possível solução do AG para o TOP numa instância com 15 vértices.....	106
Figura 38 - Funcionamento da técnica de cruzamento DPX.....	107
Figura 39 - Exemplos de vizinhanças na população estruturada para AGC em formato 2-D. ...	109
Figura 40 - Sobreposição de vizinhanças na população de um AGC.....	110
Figura 41 - Diferentes tipos de vizinhança num AGC.....	110
Figura 42- Exemplo de representação da localização de papelões de acordo com a rota a que foram atribuídos (cenário 1B – execução 5).....	142
Figura 43 - <i>Clusters</i> obtidos após 11 execuções de teste ao cenário 1B.....	144
Figura 44 - <i>Clusters</i> finais obtidas após retificação.....	144
Figura 45 - Exemplo de ficheiro de instância CTOPdTW para <i>input</i> do algoritmo que gera rotas.....	158
Figura 46 – Fases e etapas do agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores.....	167
Figura 47 - Contentor com resíduos pouco compactados que provocam o fenómeno de “falso cheio”.....	169

Figura 48 - Contentores recolhidos pela BRAVAL e pelo método de agendamento.....	196
Figura 49 – Os cinco passos do processo de decisão no beSmart.	203
Figura 50 - Seleção de alternativas de solução no beSmart.....	203
Figura 51 - Seleção de critérios no beSmart.	204
Figura 52 - Aplicação do método SMART na definição dos pesos dos critérios.....	204
Figura 53 - Aplicação do método AHP.	205
Figura 54- Aplicação do método ValueFn.....	206
Figura 55 – Exemplo de painel final do beSmart para explorar soluções.	208

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Subfactores utilizados para caracterizar o Fator Socioeconómico (FSE).	45
Tabela 2 – Fatores potencialmente relevantes para geração de resíduos para reciclagem.	46
Tabela 3 – Escala de valores para o Fator Demográfico.....	46
Tabela 4 – Medidas de exatidão para modelos de previsão.....	54
Tabela 5 – Melhores modelos de RLM para previsão de RPA.....	56
Tabela 6 – Fatores mais importantes para a previsão de RPA com modelos de RLM.....	58
Tabela 7 – Estimativas dos parâmetros para o melhor modelo de previsão de RPAP	58
Tabela 8 – Estimativa dos parâmetros para o melhor modelo de previsão de RPAP	58
Tabela 9 – Estimativa dos parâmetros para o melhor modelo de previsão de RPAP	59
Tabela 10 – Melhores modelos de RLM para previsão de RPA.....	63
Tabela 11 – Fatores mais importantes para a previsão de RPA com modelos de RNA.....	63
Tabela 12 - Desempenho geral dos modelos de previsão desenvolvidos com as metodologias adotadas.	66
Tabela 13 – Resultados obtidos com diferentes combinações do métodos RLM e RNA.	68
Tabela 14 – Fatores de correção mensais e trimestrais para o concelho de Amares.	69
Tabela 15 – Fatores de correção mensais e trimestrais para o concelho de Vila Verde.	69
Tabela 16 – Valores de DAM após aplicar fatores de correção às previsões obtidas via método RLM.	70
Tabela 17 – Valores de DAM após aplicar fatores de correção às previsões obtidas via método RNA.	70
Tabela 18 - Variantes da ferramenta GATOP-3.....	108
Tabela 19 - Ferramentas desenvolvidas com base em algoritmos genéticos celulares	114
Tabela 20 - Progressão na modelação do problema da recolha de RED.	114
Tabela 21 - Configurações dos algoritmos das ferramentas GATOP-1 e GATOP-2.	116
Tabela 22 - Configurações dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP.....	116
Tabela 23 - Resultados obtidos em 24 instâncias oficiais do TOP com as ferramentas desenvolvidas.	117
Tabela 24 - Estatísticas sobre os resultados obtidos em 24 instâncias oficiais do TOP.	118
Tabela 25 - Novos valores máximos encontrados para instâncias de teste do TOP com as ferramentas GATOP-3 e cGATOP.....	120

Tabela 26 - Estatísticas sobre a qualidade de solução obtida nas 387 instâncias de teste do TOP.	121
Tabela 27 - Valores médios de desvio percentual relativo médio (DPRM) obtidos nos conjuntos 4, 5, 6 e 7.....	122
Tabela 28 - Tempo médio de processamento nos 7 conjuntos de instâncias de teste do TOP.	123
Tabela 29 – Comparação da eficácia dos algoritmos GATOP-3 e cGA-TOP com o atual melhor algoritmo no estado da arte do TOP.	123
Tabela 30 - Estatísticas sobre a qualidade de solução obtida nas 228 instâncias de teste do TOPTW.....	124
Tabela 31 - Valores médios de desvio percentual relativo médio (DPRM) obtidos nos 4 conjuntos de instâncias.	126
Tabela 32 - Tempo médio de processamento nos 4 conjuntos de instâncias de teste do TOPTW.	126
Tabela 33 - Comparação da eficácia dos algoritmos GATOP-3 e cGA-TOP com o atual melhor algoritmo no estado da arte do TOPTW.	127
Tabela 34 - Novos valores máximos encontrados para instâncias de teste do CTOP com as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP.	128
Tabela 35 - Estatísticas sobre a qualidade de solução obtida nas 120 instâncias de teste do CTOP.	128
Tabela 36 - Valores médios de desvio percentual relativo médio (DPRM) obtidos nas instâncias de teste.	129
Tabela 37 - Tempo médio de processamento nas 120 instâncias de teste do CTOP.....	130
Tabela 38 - Comparação da eficácia dos algoritmos GATOP-3 e cGA-TOP com o atual melhor algoritmo no estado da arte do CTOP.	130
Tabela 39 - Combinações possíveis entre veículos e contentores de carga.	134
Tabela 40 - Número de contentores de carga disponíveis em função da capacidade.	134
Tabela 41 - Características dos veículos da frota da Braval.	135
Tabela 42 - Utilização dos veículos nos concelhos onde atua a Braval.....	135
Tabela 43 – Horários de trabalho da Braval para a recolha de RED nos circuitos C1 e C2.	137
Tabela 44 - Tempos de descarga de acordo com o tipo de contentor e de ecoponto.	138
Tabela 45 - Cenários de teste para identificação de <i>clusters</i> para Papelões e Embalões.....	140
Tabela 46 - <i>Clusters</i> finais com os respetivos papelões (códigos ID).....	145

Tabela 47 - Especificação das janelas temporais dos veículos para o agendamento da recolha de resíduos.	147
Tabela 48 - Excerto da projeção da evolução das quantidades acumuladas nos contentores ao longo dos dias.	150
Tabela 49 - Excerto da projeção do estado de enchimento dos contentores ao longo dos dias.	150
Tabela 50 - Excerto da projeção inicial das recolhas para cada contentor.	151
Tabela 51 - Esquemas de recolha de contentores com enchimento rápido.	152
Tabela 52 - Esquemas de recolha de contentores com enchimento rápido (representação gráfica).	153
Tabela 53 - Excerto da projeção final das janelas temporais para os papelões de Amares.	153
Tabela 54 - Estimativa das quantidades acumuladas em cada contentor para cada janela temporal.	154
Tabela 55 - Exemplo de definição de janelas temporais para os contentores (papelões).	155
Tabela 56 - Exemplo de definição de janelas temporais para veículos.	156
Tabela 57 - Exemplo do processo de determinação de réplicas de contentores (vértices).	157
Tabela 58 - Pormenor dos resultados da fase de agendamento F1 para os papelões.	160
Tabela 59 - Consolidação de valores para correção das quantidades de resíduos a recolher em cada papelão em F1.	161
Tabela 60 - Correção das quantidades diárias previstas recolher em F1.	161
Tabela 61 - Determinação do número de retornos por dia de recolha para as etapas de agendamento F2-A1 e F2-A2.	164
Tabela 62 - Comparação do número de retornos com os diferentes tipos de contentor na etapa F2-B1.	166
Tabela 63 - Capacidade do contentor a escolher para cada dia na etapa F2-B1.	166
Tabela 64 - Comparação do número de retornos com os diferentes tipos de contentor na etapa F2-B2.	166
Tabela 65 - Capacidade do contentor escolhida para cada dia na etapa F2-B2.	166
Tabela 66 - Proporção média para cada tipo de capacidade de contentor recolhido por rota.	170
Tabela 67 - Resultado do agendamento obtido em F1.	174
Tabela 68 - Retornos necessários para cada dia de recolha na subfase F2-A.	175
Tabela 69 - Resultado do agendamento obtido em F2-A.	175

Tabela 70 – Capacidade de carga e consumo de combustível dos veículos usados na recolha de vidro.....	175
Tabela 71 - Retornos necessários para cada dia de recolha na subfase F2-B.	176
Tabela 72 – Hipóteses de combinação de veículos testadas para a subfase F2-B.	176
Tabela 73 - Resultado do agendamento obtido em F2-B.	177
Tabela 74 – Resumo dos resultados obtidos nas diferentes fases do agendamento.	177
Tabela 75 – Desempenho geral do método de agendamento e da atuação da Braval.....	178
Tabela 76 – Resultados obtidos na fase de agendamento F1.....	180
Tabela 77 – Determinação dos retornos necessários na etapa F2-A1 e F2-A2 para contentores de carga de veículos com compactador.	181
Tabela 78 - Determinação dos retornos necessários nas etapas F2-A1 e F2-A2 para contentores de carga de veículos sem compactador.....	182
Tabela 79 - Consumo de combustível e capacidade de carga e dos veículos usados na recolha de papelões e embalões.	183
Tabela 80 - Resumo dos resultados para o agendamento na subfase F2-A para veículos com compactador.	183
Tabela 81 - Resumo dos resultados para o agendamento na subfase F2-A para veículos sem compactador.	183
Tabela 82 – Resultados obtidos com a combinação de veículos da subfase F2-B.....	184
Tabela 83 - Desempenho geral do método de agendamento para recolha de conjunta de papelões e embalões.	185
Tabela 84 – Resultados do agendamento da recolha de papelões na fase F1.	186
Tabela 85 – Determinação dos retornos necessários na etapa F2-A1 para contentores de carga de veículos com compactador.....	187
Tabela 86 – Determinação dos retornos necessários na etapa F2-A1 para contentores de carga de veículos sem compactador.....	188
Tabela 87 - Retornos necessários na etapa F2-A2 para contentores de carga de veículos com e sem compactador.....	189
Tabela 88 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	189
Tabela 89 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	189

Tabela 90 - Desempenho geral do método de agendamento para recolha de papelões.	190
Tabela 91 - Resultados do agendamento da recolha de papelões na fase F1.	190
Tabela 92 – Retornos necessários na F2-A para contentores de carga de veículos com e sem compactador.	191
Tabela 93 – Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	191
Tabela 94 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	192
Tabela 95 - Desempenho geral do método de agendamento para recolha de embalões.	192
Tabela 96 – Comparação entre o agendamento da recolha multi-produto e da recolha mono-produto em termos desempenho geral.....	193
Tabela 97 – Desempenho do método de agendamento e da atuação da Braval na recolha de papelões e embalões.	194
Tabela 98 - Resultados obtidos no conjunto 1 de instâncias de teste do TOP.	229
Tabela 99 - Resultados obtidos no conjunto 2 de instâncias de teste do TOP.	230
Tabela 100 - Resultados obtidos no conjunto 3 de instâncias de teste do TOP.	230
Tabela 101 - Resultados obtidos no conjunto 4 de instâncias de teste do TOP.	232
Tabela 102 - Resultados obtidos no conjunto 5 de instâncias de teste do TOP.	233
Tabela 103 - Resultados obtidos no conjunto 6 de instâncias de teste do TOP.	234
Tabela 104 - Resultados obtidos no conjunto 7 de instâncias de teste do TOP.	235
Tabela 105 - Resultados obtidos para o conjunto 1 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).....	237
Tabela 106 - Resultados obtidos para o conjunto 1 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).....	237
Tabela 107 - Resultados obtidos para o conjunto 1 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).....	237
Tabela 108 - Resultados obtidos para o conjunto 2 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).....	237
Tabela 109 - Resultados obtidos para o conjunto 2 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).....	238
Tabela 110 - Resultados obtidos para o conjunto 2 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).....	238

Tabela 111 - Resultados obtidos para o conjunto 3 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).....	238
Tabela 112 - Resultados obtidos para o conjunto 3 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).....	239
Tabela 113 - Resultados obtidos para o conjunto 3 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).....	240
Tabela 114 - Resultados obtidos para o conjunto 4 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).....	240
Tabela 115 - Resultados obtidos para o conjunto 4 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).....	241
Tabela 116 - Resultados obtidos para o conjunto 4 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).....	241
Tabela 117 – Resultados obtidos nas instâncias de teste do CTOP.....	242
Tabela 118 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na subfase F2-A para veículos com compactador.....	245
Tabela 119 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na subfase F2-A para veículos sem compactador.....	245
Tabela 120 – Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	246
Tabela 121 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	247
Tabela 122 - Detalhe dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	248
Tabela 123 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.....	248
Tabela 124 – Lista completa com os 39 fatores testados nos modelos de previsão.	250

Lista de Siglas e Abreviaturas

- AC – Algoritmo Construtivo
- AD – Agente de Decisão
- AG – Algoritmo Genético
- AGC – Algoritmo Genético Celular
- AGG – Algoritmo Genético Geracional
- ADMC – Análise de Decisão Multi-Critério
- CTOP – *Capacitated Team Orienteering Problem*
- CTOPTW – *Capacitated Team Orienteering Problem with Time Windows*
- CTOPdTW – *CTOP with double Time Windows*
- CTOPdTW-HF – *CTOP dTW with Heterogeneous Fleet*
- CTOPdTW-MPC – *CTOPdTW with Multi-Product Collection*
- CTOPdTW-MPC-HF – *CTOPdTW with Multi-Product Collection and Heterogeneous Fleet*
- CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem*
- DAM – Desvio Absoluto Médio
- DPRM – Desvio Percentual Relativo Médio
- FCM – Fator de Correção Mensal
- ID – Indicadores de Desempenho
- JT – Janela Temporal
- R^2 – Coeficiente de Determinação
- RED – Resíduos de Embalagens Domésticas
- RLM – Regressão Linear Múltipla
- RNA – Redes Neurais Artificiais
- RPA – Recolhas Por Ano
- RPM – Recolhas Por Mês
- RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
- SAD – Sistema de Apoio à Decisão
- TOP – *Team Orienteering Problema*
- TOPTW – *Team Orienteering Problem with Time Windows*
- TOPdTW – *Team Orienteering Problem with double Time Windows*
- VRP – *Vehicle Routing Problem*
- VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma introdução ao trabalho realizado pelo autor no seu projeto de doutoramento. Inicialmente são descritas as motivações que conduziram à realização deste trabalho, bem como os problemas que constituíram a oportunidade de investigação. Posteriormente é feito um enquadramento da investigação desenvolvida e seguidamente os objetivos são apresentados. No final deste capítulo é fornecida a estrutura geral da tese que inclui breves sumários sobre cada um dos restantes capítulos.

1.1 Oportunidade de investigação e motivação

Na natureza, os seres humanos, ao contrário dos outros seres vivos, são os únicos que colocam o meio ambiente em risco com as suas atividades e formas de agir. O nosso modo de vida, o nível de consumo tecnológico e os nossos hábitos alimentares constituem a maior fonte de geração de resíduos e materiais poluentes. De modo a gerir e controlar esta contínua geração de resíduos, diversas diretivas foram desenvolvidas e aplicadas, tais como as ações de redução, reutilização e de reciclagem de resíduos. A reciclagem é um processo muito importante e indispensável para a manutenção da nossa existência no planeta, uma vez que permite a redução do consumo de matérias-primas e de energia, redução da poluição no ar (menos resíduos para incineração), redução da poluição na água (menos resíduos depositados em aterros), e ainda a diminuição das emissões de gases que contribuem para o efeito de estufa (p.ex. menos produção de plásticos). A reciclagem permite que vários tipos de resíduos sejam transformados em materiais potencialmente úteis que podem ser incluídos na produção de diversos novos produtos. Os resíduos que potencialmente podem ser reciclados fazem parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU), ou lixo urbano, e incluem vários tipos de vidro, metal, plástico, papel e cartão, materiais têxteis, dispositivos electrónicos, baterias e pilhas, e até mesmo pneus de automóveis. Também se considera reciclagem a reutilização de produtos biodegradáveis como restos de alimentos ou desperdícios de jardim ou quintal. De modo a recolher estes resíduos potencialmente recicláveis é crucial que exista uma separação adequada do lixo de modo a gerar um fluxo especial de resíduos dissociados do lixo comum. Essa separação é feita

através de uma simples tarefa diária que cada pessoa efetua na sua habitação, utilizando um recipiente específico para cada um dos diferentes grupos de resíduos recicláveis. Após a separação a nível doméstico segue-se a tarefa de colocar os resíduos separados nos pontos de recolha, que contêm normalmente um contentor específico para cada classe de resíduos recicláveis. Estes pontos de recolha são normalmente disponibilizados por serviços municipais encarregues de gerir a recolha de lixo urbano. Por conseguinte, é necessário aplicar um sistema de recolha diferente do que é usado para o lixo comum, recolhido normalmente porta-a-porta.

Em Portugal foram implementadas redes de pontos de recolha em cada município. Estas redes são geridas por empresas que se dedicam exclusivamente à recolha de lixo para reciclagem. São estas empresas que disponibilizam à população os pontos de recolha, que são habitualmente colocados junto a zonas residenciais, com maior concentração destes pontos em zonas urbanas, e com maior dispersão em subúrbios (zonas peri-urbanas) e zonas rurais.

Muitos dos problemas que são comuns às várias empresas de recolha de resíduos para reciclagem centram-se não apenas no projeto de uma rede de pontos de recolha que seja bastante acessível à população, mas principalmente no desenvolvimento de métodos eficientes para efetuar a recolha desses pontos, em que é essencial efetuar uma gestão eficaz e eficiente de vários recursos em simultâneo. Uma dificuldade que normalmente surge no contexto dessa gestão de recursos é a construção de rotas de recolha que otimizem o seu desempenho geral usando um número limitado de veículos, procurando recolher diariamente a maior quantidade possível de resíduos, implicando o mínimo de despesas associadas. Esta necessidade de otimização das rotas de recolha está portanto inerente à gestão de pessoas e recursos materiais. Relativamente aos recursos materiais destacam-se os veículos utilizados na recolha, o que remete para a questão da gestão de frota. No âmbito da gestão de frota, o encaminhamento dos veículos para efetuar a recolha pode passar pela aplicação de técnicas matemáticas ou algoritmos que permitam determinar as melhores rotas, procurando alcançar um certo nível de desempenho, ao mesmo tempo que se cumprem diversas restrições como a imposição de uma duração ou distância máximas para cada rota, bem como as capacidades de carga dos veículos. Outras condicionantes para a gestão de frota estão relacionadas com limitações em termos de alocação de recursos humanos aos veículos e rotas de recolha.

Um processo importante para se obter soluções otimizadas na recolha de resíduos é a modelação eficaz do problema de encaminhamento de veículos (PEV). Para tal é necessário inicialmente descrever os vários elementos e condicionantes inerentes ao problema (fase de

formulação). Posteriormente desenvolve-se um modelo matemático para representar o problema, onde se descrevem os seus aspetos essenciais. Por fim desenvolve-se uma metodologia para resolver o modelo matemático, ou então aplica-se diretamente uma metodologia já existente, fazendo as adaptações que forem necessárias para se adequar ao problema. Existe uma panóplia de diferentes problemas que decorrem das áreas de gestão de frotas e encaminhamento de veículos, os quais se desenvolveram a partir de situações reais e de formulações puramente académicas.

Atualmente há uma vasta escolha em termos de metodologias que podem ser aplicadas para resolver problemas de encaminhamento de veículos. Contudo, o PEV associado à recolha de RSU para reciclagem é um problema bastante complexo e peculiar, e por essa razão torna-se necessário desenvolver um método específico para o resolver. Apesar de existirem inúmeros métodos de resolução disponíveis em publicações académicas, a investigação nesta área mantém-se aliciante e desafiante, uma vez que existe margem para o desenvolvimento de novas ideias e métodos, ou até mesmo novas técnicas que complementem e melhorem os atuais métodos existentes, principalmente no caso particular da recolha de RSU para reciclagem.

1.2 Enquadramento

O projeto de investigação apresentado neste documento está integrado num projeto de investigação e desenvolvimento (I&D) de maiores dimensões denominado GATOP (*Genetic Algorithm for Team Orienteering Problem*), e vários objetivos são comuns a ambos os projetos. Os avanços efetuados e contribuições decorrentes da presente investigação irão também beneficiar o projeto GATOP.

O GATOP é um projeto que foi aprovado pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT). O projeto GATOP divide-se em cinco tarefas complementares que contribuem para um objetivo geral que é o desenvolvimento de métodos mais eficientes e completos para diversos problemas reais de encaminhamento de veículos, com especial ênfase na gestão da recolha seletiva de resíduos sólidos urbanos. As cinco tarefas referidas são: 1) desenvolvimento, implementação e teste de métodos heurísticos e estratégias de otimização de rotas; 2) previsão da geração de resíduos; 3) gestão das condições de tráfego rodoviário para transportes; 4) aplicação de modelos de análise de decisão multi-critério; 5) validação através de modelos de simulação. Pretende-se que todos os modelos e soluções desenvolvidas no âmbito do projeto GATOP funcionem em sintonia num sistema de apoio à decisão (SAD), e sejam incluídos num

software de fácil e intuitiva utilização que possa auxiliar na resolução dos problemas de decisão enfrentados pelos gestores de recolha de RSU.

1.3 Objetivos e Contributos

Neste projeto de doutoramento pretende-se efetuar investigação científica no âmbito da gestão da recolha de resíduos sólidos urbanos para reciclagem, com especial foco na otimização das rotas de recolha. Pretende-se desenvolver um novo método que ajude a melhorar a gestão de frota, nomeadamente ao nível do encaminhamento de veículos, com aplicação prática a um problema real de grande dimensão, considerando uma frota de veículos limitada, e explorando uma abordagem de recolha multi-produto. A previsão da geração de resíduos será considerada como uma parte integrante da otimização de rotas, bem como a aplicação de modelos de análise de decisão multi-critério. Serão consideradas restrições como duração máxima das rotas, distância máxima a percorrer por rota, capacidade máxima de carga dos veículos e a existência de janelas temporais que determinam os intervalos de tempo durante os quais se deve recolher os resíduos num determinado ponto de recolha.

A nível tecnológico, o objetivo geral deste projeto de doutoramento é o desenvolvimento de ferramentas de *software* que componham um sistema de apoio à decisão (SAD) capaz de determinar rotas mais eficientes para diferentes situações de encaminhamento de veículos no âmbito da recolha de RSU para reciclagem, procurando recolher a maior quantidade possível, respeitando as capacidades máximas dos veículos e outras restrições impostas. Pretende-se fundamentalmente desenvolver e explorar hipóteses que possam contribuir para melhorar o nível de eficiência e a eficácia no processo de recolha RSU para reciclagem. Em particular, esta investigação irá centrar-se na concretização dos seguintes objetivos:

- Desenvolver metodologias para modelar e resolver o problema de encaminhamento de veículos associado ao processo de recolha de resíduos para reciclagem;
- Desenvolver um modelo de previsão que permita estimar as quantidades de resíduos para reciclagem geradas numa rede de pontos de recolha;
- Desenvolver um método de agendamento de recolhas que seja eficiente e eficaz quando comparado com métodos aplicados por empresas que gerem a recolha de resíduos.
- Construir um modelo do problema real e efetuar simulações de modo a analisar e validar as soluções alcançadas comparando com dados sobre o desempenho obtido em situações reais;

- Avaliar a utilidade da aplicação de modelos de análise de decisão multi-critério para auxiliar na escolha das melhores estratégias de otimização de rotas atendendo a diversos indicadores de desempenho importantes para a gestão de frotas e de outros recursos no âmbito da recolha de resíduos para reciclagem;
- Projetar um sistema de apoio à decisão que integre o funcionamento conjunto dos módulos de otimização de rotas, previsão da geração de resíduos e análise de decisão multi-critério.

Em termos de contribuições que se pretendem obter com esta tese, estas serão decorrentes de investigação fundamental (contribuições científicas académicas) e de investigação aplicada (contribuições científicas para problemas reais). Como investigação fundamental considera-se: a modelação de um problema real que introduz uma nova classe de problemas de encaminhamento de veículos; o desenvolvimento de métodos heurísticos aperfeiçoados especificamente para essa nova classe de problemas; e ainda o desenvolvimento de diferentes abordagens e métodos para efetuar previsão da geração de resíduos. Na parte de investigação aplicada inclui-se: a modelação e simulação de situações reais da recolha de RSU para reciclagem; a aplicação de métodos de análise de decisão multi-critério na gestão de recursos; o desenvolvimento e aplicação de um método específico de agendamento de recolhas; e também a concepção de um SAD com aplicação prática no âmbito da gestão da recolha resíduos.

1.4 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se estruturado em oito capítulos, em que o primeiro capítulo consiste numa introdução ao trabalho desenvolvido no projeto de doutoramento. No segundo capítulo é feita uma apresentação do problema que se pretende estudar, e são sugeridas as medidas gerais a implementar para obter soluções para o problema. Neste capítulo é também apresentado o caso de estudo no qual se foca esta investigação. Ainda no segundo capítulo é apresentada a concepção projetada para um sistema de apoio à decisão, o qual compreende os vários elementos que serão desenvolvidos e apresentados ao longo dos capítulos seguintes.

No terceiro capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos trabalhos que se relacionam com os problemas estudados nesta investigação. Mais especificamente são referidos trabalhos publicados na área da otimização do encaminhamento de veículos, na área do encaminhamento de veículos no contexto da recolha de resíduos, na área da previsão da geração de resíduos, e

ainda a área de aplicação de métodos de análise de decisão multi-critério no âmbito da recolha de resíduos.

O quarto capítulo foca-se no desenvolvimento de ferramentas para se efetuar previsão da geração de resíduos. São efetuadas experiências com modelos de previsão com base em dados reais, utilizando duas metodologias diferentes.

No quinto capítulo apresenta-se o desenvolvimento de ferramentas para a otimização de rotas e encaminhamento de veículos. O processo da recolha de resíduos para reciclagem é modelado como um problema de orientação de equipas com múltiplas restrições. São desenvolvidos métodos para resolver o problema modelado, sendo testados em contextos académicos. Neste capítulo foi incluída uma revisão bibliográfica adicional sobre métodos metaheurísticos aplicados a problemas de encaminhamento de veículos relacionados com a metodologia adoptada neste trabalho.

O sexto capítulo incide no desenvolvimento de um método de agendamento de recolhas para diferentes tipos de contentores em ecopontos. O método desenvolvido é testado em contextos reais com dados de uma empresa que efetua recolha de resíduos para reciclagem.

O sétimo capítulo consiste num estudo sobre a aplicação de métodos de análise de decisão multi-critério, onde se avalia sua utilidade no contexto da recolha de resíduos para reciclagem.

Por fim, no oitavo capítulo são apresentadas as conclusões gerais da investigação realizada, onde se discute a utilidade e aplicação das ferramentas desenvolvidas, bem como o que é sugerido para trabalho futuro de modo a se expandir e melhorar o desempenho dessas ferramentas.

CAPÍTULO II

RECOLHA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UM PROBLEMA REAL

Neste capítulo pretende-se apresentar o problema da recolha de certos resíduos sólidos urbanos (RSU) que são potencialmente recicláveis, bem como as dificuldades associadas à gestão do processo efetivo dessa recolha. Inicialmente será abordada a temática dos RSU e discutida a importância da reciclagem e reaproveitamento de diversos tipos materiais. Posteriormente serão expostos vários processos relacionados com a gestão da recolha de resíduos para reciclagem. Por fim, será realizada uma análise sobre ações que podem ser desenvolvidas para otimizar o processo de recolha de resíduos para reciclagem. Entenda-se que “otimizar”, neste contexto, engloba um conjunto de ações e práticas que permitam melhorar o desempenho atual dos sistemas de gestão da recolha de resíduos. Também se apresenta neste capítulo um conceito de um sistema de apoio à decisão para a gestão da recolha de resíduos para reciclagem. É ainda apresentado um caso de estudo de uma empresa que, entre outras atividades, efetua recolha de resíduos para reciclagem, e que irá servir como projeto-piloto para aplicação das metodologias desenvolvidas durante a elaboração da investigação científica descrita neste documento.

2.1 Resíduos sólidos urbanos e reciclagem

Os resíduos sólidos urbanos, mais vulgarmente referidos como lixo urbano, resultam da atividade doméstica e comercial nas povoações. Em termos de composição, os RSU podem variar de zona para zona, mas no geral incluem os seguintes tipos de resíduos:

- Matéria orgânica: restos de alimentos;
- Papel: jornais, revistas, caixas e embalagens;
- Plásticos: garrafas, garrafões, frascos e outras embalagens;
- Vidro: garrafas, frascos, copos;
- Metais: latas e outros recipientes;
- Outros: roupas, óleos de cozinha e óleos de motor, resíduos informáticos/tecnológicos;
- Tóxicos: aerossóis vazios, pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes, restos de medicamentos.

A recolha de RSU pode ser indiferenciada ou seletiva. Na recolha indiferenciada não existe nenhuma seleção de resíduos, sendo todos rotulados como lixo comum. Já na recolha seletiva, os resíduos encontram-se separados no momento da coleta de acordo com os diferentes tipos de resíduo. Após a recolha de RSU, estes têm normalmente três destinos: aterro sanitário, unidade de incineração, e unidade de valorização e tratamento de resíduos.

2.1.1 Hierarquia da gestão de resíduos

A hierarquia da gestão dos resíduos é um conceito utilizado para promover a proteção do ambiente e a conservação de recursos naturais através de uma abordagem assente na priorização de medidas que constam nas leis relativas à gestão e tratamento de resíduos. A hierarquia adotada indica a ordem de preferência para pôr em prática ações para reduzir e gerir a geração de resíduos. As ações da hierarquia de gestão de resíduos são as seguintes: prevenção, redução, reutilização, reciclagem, recuperação/produção de energia, eliminação (p.ex. deposição em aterro e incineração). Esta hierarquia é normalmente representada na forma de uma pirâmide (Figura 1).

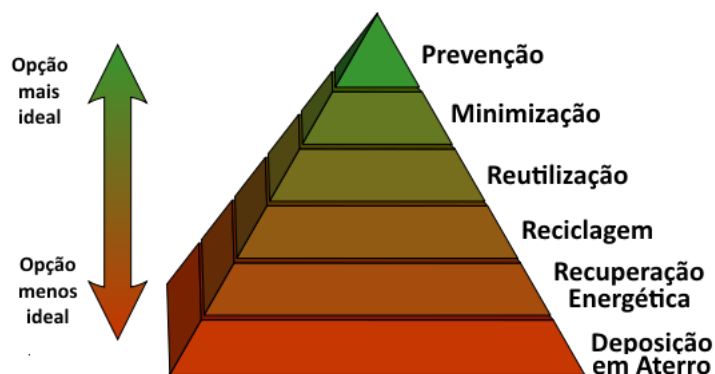


Figura 1 – Modelo pirâmide da hierarquia da gestão de resíduos.

Neste modelo em pirâmide constam seis ações dispostas por ordem descendente de prioridade de execução. Estas ações são a prevenção, minimização, reutilização, reciclagem, recuperação energética e deposição em aterro (eliminação). O objetivo da hierarquia de gestão dos resíduos é extrair o máximo de benefícios práticos dos produtos e gerar o mínimo de resíduos. A aplicação destas ações de acordo com a hierarquia pode concretizar-se em diversos benefícios, desde redução da emissão de gases poluentes, poupança de energia, poupança de recursos, criação de empregos e desenvolvimento de tecnologias ecológicas.

Durante as últimas décadas, a União Europeia (UE) tem publicado várias diretivas e relatórios que são muito relevantes para a área da gestão de resíduos. Alguns destes documentos são ricos em termos de dados e estatísticas. A informação fornecida por estes documentos deveria ser bem apreendida por parte dos cidadãos de modo a estarem mais alerta e a par da importância da recolha e tratamento de resíduos.

Para se ter uma ideia da dimensão do problema ambiental decorrente da geração de resíduos, de acordo com o Eurostat [35], em 2012 gerou-se uma média de 489 kg de resíduos *per capita* por ano nos países da EU-27. Em Portugal esse valor é de 453 kg *per capita*. Em termos de resíduos de embalagens domésticas (RED), em 2012, cada cidadão dos países da EU-27 gerou 131 kg *per capita* por ano, o que representa cerca de 27% do total de resíduos gerados. Já em Portugal, apenas se geram 53 kg *per capita* por ano de RED (aproximadamente 12% do total de resíduos), o que indica um baixo nível de separação de RED dos restantes resíduos.

2.1.2 Reciclagem e a política dos 3 R's

Durante as últimas duas décadas, o ato de reciclar adquiriu elevada relevância, e de entre as ações da política dos 3 R's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar), a reciclagem é possivelmente a que ganhou mais preponderância, tendo-se tornado uma questão de educação na sociedade atual, de modo a se perspetivar um meio ambiente mais limpo e um melhor futuro para o planeta.

A política dos 3 R's engloba um conjunto de ações que foram apresentadas durante a conferência da ONU "Cúpula da Terra" (*Earth Summit - ECO92*), realizada no Rio de Janeiro (Brasil) em 1992. A referida política tem como objetivo contribuir para a redução do impacto que a geração de resíduos tem para o meio ambiente, defendendo que a sua diminuição é crucial para se poder sustentar o estilo de vida moderno atual.

A reciclagem de resíduos tem vindo a ganhar importância ao longo dos anos, e atualmente é um processo essencial para a futura sobrevivência dos seres humanos e dos outros seres vivos, promovendo a manutenção de um meio ambiente suficientemente limpo e saudável. Devido aos hábitos alimentares e de consumo da sociedade atual, uma porção muito significativa da quantidade de RSU é composta por materiais recicláveis. A maioria desses materiais constitui diversos fluxos de resíduos como: vidro, metal, plástico, papel, cartão, têxteis, baterias/pilhas, e pneus de automóveis. De modo a se caminhar em direção a um futuro sustentável, melhorias devem ser feitas constantemente na área da gestão da recolha de resíduos para reciclagem.

Esta área tem-se tornado fértil para o surgimento de novas ideias e ferramentas que melhoram a gestão de recursos utilizados no processo da recolha de resíduos, contribuindo para a eficiência global das empresas que gerem esse processo.

2.1.3 O conceito de reciclagem

A reciclagem, em termos de conceito, é um processo de transformação de materiais que podem ser revertidos para o seu estado original, ou seja, transformam-se em produtos iguais em todas as suas características. O conceito de reciclagem difere do conceito de reutilização, pois este último consiste no reaproveitamento de materiais para produzir um novo produto ou material com características diferentes. Por exemplo, o papel e o vidro, após serem transformados ou “reciclados”, não voltam a possuir as mesmas características físico-químicas que detinham antes da transformação, ficando com cor, textura, composição e densidade diferentes, ocorrendo assim reutilização ou reaproveitamento desses materiais. No caso das latas de alumínio, estas podem ser fundidas e tornadas em novos produtos com as mesmas propriedades, ou seja, ocorre a dita reciclagem segundo o seu conceito geral. Assim sendo, para os diversos materiais e resíduos existem algumas diferenças conceituais entre reciclagem e reaproveitamento. Por exemplo, o reaproveitamento do papel não pode ser repetido indefinidamente, uma vez que ocorre a degradação progressiva das características do material, mais especificamente as fibras de celulose vão-se encurtando a cada nova transformação. No entanto, a reciclagem do alumínio pode ser repetida indefinidamente, pois após cada transformação, as suas propriedades físicas e químicas mantêm-se iguais. Apesar das diferenças conceituais entre reciclagem e reutilização/reaproveitamento, ao longo deste documento, assume-se que o termo reciclagem engloba os dois conceitos de transformação de materiais/resíduos, pois a ênfase deste trabalho de investigação é na recolha dos resíduos quer sejam para efeitos de reciclagem quer para reutilização.

A reciclagem é o processo de transformar materiais (resíduos) em novos produtos, para assim prevenir o desperdício de materiais potencialmente úteis, reduzir o consumo de matérias-primas, reduzir o consumo de energia. Também permite reduzir a poluição do ar, do solo e da água, através da redução da necessidade de deposição de mais resíduos em aterros ou incineração destes.

Os materiais potencialmente recicláveis podem ser de vários tipos: vidro, papel, metal, plástico, têxteis e de produtos electrónicos. Outro exemplo são os resíduos biodegradáveis, como

restos de comida de origem vegetal ou produtos residuais de jardim/quintal, que podem ser de certa forma “reciclados” através de compostagem.

Os materiais para reciclagem, após serem recolhidos, são organizados, classificados, limpos e reprocessados, para darem assim origem a renovados materiais e novos produtos. Num sentido mais concreto, a reciclagem de um material permite produzir um abastecimento direto desse mesmo material. Por exemplo, papel usado é convertido em papel novo; esferovite usado é transformado em novo esferovite. Porém, estas transformações são por vezes difíceis ou mais dispendiosas do que produzir um material recorrendo às matérias-primas originais, e por isso é comum reciclar os materiais através da incorporação destes na produções de novos materiais (p. ex. papel utilizado para fabricar cartão). Outra forma de reciclagem inclui resgatar certos materiais ou componentes de produtos mais complexos: retirar o chumbo das baterias de automóveis; o ouro de equipamentos electrónicos/informáticos; o mercúrio presente em vários utensílios; entre outros.

2.1.4 Efeitos da reciclagem e críticas à sua ação

Os efeitos da reciclagem podem induzir bons resultados (melhorias) a nível ambiental, económico e social. A nível ambiental, torna-se claro que a reciclagem contribui para a redução da acumulação de resíduos, uma vez que se evita a produção/extração de novas matérias-primas para gerar produtos. A produção de papel é um exemplo desta situação, pois quando este é reciclado, evita-se o corte de mais árvores, a emissão de metano e dióxido de carbono, e também agressões ao solo, ar e água. A nível económico, a reciclagem promove uma utilização mais racional e consciente dos recursos naturais, e contribui para a reposição de recursos que podem ser reaproveitados. No contexto social, a reciclagem proporciona melhorias na qualidade de vida das pessoas através da preservação do meio ambiente, e também é uma atividade que gerou novos postos de trabalho ao longo do tempo.

Existe porém alguma crítica aos processos de reciclagem, em que se discute o balanço entre os seus benefícios (económicos e ambientais) e os custos que lhes estão associados. Mais especificamente, os críticos apontam o facto de os custos e energia utilizada na recolha e transporte de resíduos superam normalmente as poupanças de custos e energia utilizada nos processos de produção. Também sublinham que os postos de trabalho criados em torno do processo de reciclagem não são uma boa “troca” pelos trabalhos associados à extração de matérias-primas. Outros dilemas que apresentam são o facto de alguns materiais só poderem

ser reciclados um número limitado de vezes (p.ex. o papel). Contudo, a discussão mantém-se acesa, e os apoiantes/promotores da reciclagem contestam as alegações e críticas apresentadas pelas entidades anti-reciclagem.

2.1.5 Resíduos de embalagens domésticas

Existem diferentes fluxos de resíduos sólidos urbanos, e uma grande parte deles (mais de 50%) são compostos de resíduos de embalagens domésticas (RED), e constituem uma das principais fontes de materiais potencialmente recicláveis [41]. Os RED, quando são tratados e processados corretamente podem ser transformados e/ou reutilizados/reaplicados de diferentes formas, evitando assim a realização de mais processos de incineração ou deposição em aterros. Os RED abrangem diferentes tipos de materiais recicláveis:

- Papel e cartão: jornais, revistas, caixas e embalagens;
- Plástico e metal: garrafas, garrafões, frascos, latas, e outros recipientes e embalagens;
- Vidro: garrafas, frascos, copos.

O processo de reciclagem dos RED inicia-se com uma simples tarefa executada pelos cidadãos e que consiste em separar os diferentes tipos de resíduos que se geram nas habitações (e fora delas), nos espaços comerciais e até industriais. Os resíduos são posteriormente depositados em pontos de recolha que se encontram, por norma, facilmente acessíveis à população, existindo em maior concentração em zonas urbanas, e mais dispersos nos subúrbios e zonas rurais. Em Portugal, um ponto de recolha de RED denomina-se ecoponto (ponto ecológico). Um ecoponto é normalmente composto por três contentores: 1) o vidrão, de cor verde, onde se colocam recipientes de vidro, entre outros; 2) o papelão, que tem cor azul, é onde se pode colocar tudo o que é composto por papel ou cartão; 3) o embalão, assinalado com cor amarela, e é onde se depositam embalagens e outros recipientes ou materiais constituídos por plástico ou metal. Um exemplo de ecoponto com os diferentes tipos de contentores está apresentado na Figura 2. Em cada ecoponto está normalmente disponível a designação do tipo de materiais que se podem depositar em cada contentor.



Figura 2 – Ecoponto com os contentores: embalão (amarelo), papelão (azul) e vidro (verde). - Fonte: braval.pt

2.2 Gestão do processo de recolha de resíduos de embalagens domésticas

Em Portugal existe o Sistema Ponto Verde, que é coordenado pela Sociedade Ponto Verde, S.A., (SPV), uma organização responsável pela recolha e reciclagem de resíduos de embalagens domésticas, comerciais e industriais em 308 municípios. A SPV promove a recolha seletiva, a retoma e a reciclagem de resíduos de embalagens de modo a garantir que se alcancem as metas estipuladas pela lei Portuguesa e da UE em termos de reciclagem e recuperação de resíduos.

Em Portugal, os resíduos de embalagens domésticas (RED) são separados pelos cidadãos em pontos de recolha chamados ecopontos. Os ecopontos são disponibilizados pelos municípios com o único propósito de se colocar RED nos seus contentores. Atualmente em Portugal existem cerca de 40.000 ecopontos [76], e a tendência é que este número aumente. Dadas as metas que Portugal tem que cumprir no âmbito da recuperação e reciclagem de RED, existe uma necessidade permanente para se aumentar a eficiência na recolha de resíduos.

Em Portugal, a recolha seletiva de resíduos de embalagens domésticas (RED) iniciou-se no ano 2000. Após serem recolhidos, os RED passam por um processo de triagem para separação em categorias específicas e também para remoção de materiais colocados nos pontos de recolha que não são recicláveis ou que foram indevidamente lá colocados. Após essa triagem, os materiais são limpos e encaminhados para processamento de modo a se transformarem em renovadas matérias-primas.

O processo de recolha de resíduos para reciclagem tem ganho muita importância, e ao mesmo tempo tornou-se uma fonte de questões interessantes na área da logística e gestão de

recursos. O processo de recolha de resíduos recicláveis envolve quatro tipos de recursos principais que requerem especial gestão: 1) veículos 2) trabalhadores (condutores e ajudantes), 3) ecopontos, e 4) tempo (turnos de trabalhos e agendamento de recolhas). Existem no entanto elementos que dificultam a gestão dos recursos tais como: limitações de custos (combustível, manutenção dos veículos, etc.), restrições às distâncias que serão percorridas e às quantidades máximas/mínimas a recolher num período de tempo, e outras imposições relativas ao cumprimento de certos padrões de desempenho.

Presentemente, a recolha de resíduos para reciclagem é um processo muito dispendioso, especialmente quando é efetuado em grande escala, e muitas das estratégias atualmente aplicadas têm frequentemente baixa eficiência e eficácia. Um problema importante neste contexto está relacionado com a gestão da frota de veículos que realiza a recolha dos resíduos. Existem empresas especialmente dedicadas à recolha e gestão de resíduos para reciclagem. Uma estratégia muito comum destas empresas é a execução de rotas fixas, pouco ou nada otimizadas, e aplicam uma calendarização fixa dessas mesmas rotas.

Apesar da abundante oferta de *software* comercial para gestão de frotas, os gestores nas empresas de recolha de resíduos não obtêm ajuda suficiente quando lidam com requisitos orçamentais, agendamento de atividades e gestão de recursos para realização de atividades, para cumprir as diversas restrições que lhe são impostas. As opções a nível de *software* comercial para apoio à gestão da recolha seletiva de resíduos para reciclagem não oferecem soluções que permitam cumprir os padrões de eficiência e redução de despesa que as empresas de gestão de resíduos pretendem alcançar. Assim, há necessidade de desenvolvimento de novas metodologias e ferramentas que auxiliem efetivamente os gestores a lidar com problemas de sequenciamento, e que também permitam a revisão ou alteração de planos e horários (ou agendamentos) de forma dinâmica durante a execução do processo de planeamento de rotas.

2.3 Otimização do processo de recolha seletiva de resíduos

2.3.1 Importância da otimização da recolha seletiva de resíduos

No contexto da recolha seletiva de RED, uma boa gestão da frota e dos recursos associados é fundamental para que a reciclagem possa ser mais eficiente. Diversas melhorias podem ser conseguidas através de uma boa gestão da frota de veículos. Projetar rotas mais eficientes implica determinar um equilíbrio entre o uso dos recursos disponíveis e o nível de concretização

dos objetivos traçados, cumprindo todas as restrições associadas. Uma recolha otimizada de resíduos é crucial para que a reciclagem implique menores encargos financeiros para as empresas de gestão de resíduos, pois consequentemente os cidadãos poderão beneficiar de decréscimos nas taxas ou tarifas que lhes são imputadas.

2.3.2 Modelação do processo de recolha seletiva de resíduos

Um dos problemas principais na otimização da recolha seletiva consiste em modelar da forma mais adequada o processo de recolha seletiva de RED. Na concepção de rotas otimizadas, o objetivo geral consiste em utilizar uma frota com um número limitado de veículos para visitar um conjunto de pontos de recolha de resíduos. No entanto devem ser respeitadas restrições como a capacidade máxima de cada veículo, autonomia dos veículos, distâncias máximas a percorrer por rota e duração máxima de cada rota. Uma aproximação a esta situação é o problema de encaminhamento de veículos, do inglês *vehicle routing problem* (VRP), amplamente conhecido no mundo académico. O conceito do VRP foi primeiramente apresentado por *Dantzig e Ramser* [31] sob o nome "*The Truck Dispatching Problem*". Este problema é descrito na literatura como uma situação de encaminhamento de veículos, em que o objetivo consiste em projetar as rotas com menor custo associado, de modo a efetuar entrega ou recolha de produtos desde um ponto de depósito até a um conjunto de clientes cuja procura por um determinado produto ou serviço é conhecida *a priori*. Assume-se que existe uma frota ilimitada de veículos disponível. Adicionalmente, cada cliente do conjunto tem de ser visitado exatamente uma vez e por um só veículo, procurando minimizar o total de veículos utilizados, bem como a distância percorrida por cada um. Quer seja um caso de entrega ou recolha de produtos, as rotas devem ser projetadas sem que haja violação da capacidade total de carga de cada veículo.

No entanto, algumas situações reais requerem sistemas mais flexíveis e que permitam a seleção de clientes a visitar. Isto leva a uma reinterpretação do VRP que conduz a uma classe de problemas chamada *vehicle routing problems with profits* (problema de encaminhamento de veículos com lucros), em que o conjunto de clientes a visitar não é previamente fixado. Ao invés, devem ser determinados quais os clientes a visitar e em que ordem devem ser visitados, tendo em conta o lucro que cada um representa e custo associado à deslocação (visita). Dentro desta classe de problemas existe um que tem sido estudado mais profundamente e se designa por problema de orientação de equipas, do inglês *team orienteering problem* (TOP). No contexto da recolha de resíduos para reciclagem está implícita uma "seleção de clientes", pois uma rede de

recolha pode conter várias centenas ou até milhares de pontos de recolha (ecopontos), e as empresas necessitam de selecionar em cada dia quais os pontos que serão recolhidos, utilizando um número limitado de veículos. Assim, o modelo do TOP adequa-se a esta situação, e neste âmbito pode ser descrito como o problema cujo objetivo é projetar rotas otimizadas para um conjunto limitado de veículos que realiza a recolha de diferentes tipos de resíduos dispostos ao longo de uma rede de pontos de recolha. A cada um destes pontos está associado um determinado nível de prioridade (lucro), fortemente relacionado com a quantidade de resíduos que contém num dado momento e o seu respetivo ritmo de enchimento. As rotas de recolha têm uma duração ou distância máxima, e a seleção de pontos a serem recolhidos pelos veículos é feita tendo em consideração o respetivo nível de prioridade e a sua contribuição para a duração da rota ou distância percorrida. O objetivo global consiste em maximizar o “lucro” obtido em todas as rotas sem nunca exceder as limitações impostas ao tempo ou distância de cada rota, bem como as limitações em termos de capacidade de carga dos veículos.

O processo de recolha de RED é portanto um caso em que existe necessidade de seleção dos ecopontos a visitar em cada dia com uma frota de veículos. A escolha dos pontos que devem ser visitados pelos veículos deve atender à prioridade de recolha de cada um desses pontos, ou seja, os mais prioritários possuem um nível de urgência de recolha mais elevado. Um ecoponto é ou não selecionado para ser visitado tendo em consideração a quantidade de resíduos que contém e o ritmo de enchimento dos contentores que o constituem (papelão, embalão e vidro). Como vantagem desta abordagem de modelação do processo de recolha de RED com base na urgência de recolha salienta-se a maior flexibilidade na calendarização das recolhas, evitando visitas desnecessárias a ecopontos que não estão suficientemente cheios, como pode acontecer com na estratégia das visitas periódicas e rotas fixas.

2.3.3 Medidas a implementar para a otimização da recolha seletiva

A recolha seletiva de resíduos é um processo que necessita de otimização, no sentido de se alcançarem melhorias de desempenho com a execução das rotas de recolha. Ao se efetuarem rotas de recolha mais eficientes, as empresas podem reduzir os custos operacionais associados. Além disso, também se podem minimizar os efeitos nocivos para o ambiente, pois com melhor planeamento e agendamento das recolhas é possível diminuir as distâncias totais percorridas pelos veículos, e conseqüentemente diminuir as emissões de gases poluentes. A otimização da recolha de resíduos para reciclagem é uma cação com elevada importância, onde os benefícios

alcançados afetarão positivamente o ambiente e a qualidade de vida das pessoas de forma direta e indireta.

Existem várias abordagens que podem ser aplicadas e desenvolvidas para se alcançarem melhorias na recolha seletiva de resíduos. Contudo, neste trabalho de investigação considera-se que as melhores opções a explorar são as seguintes:

1. Otimização das rotas de recolha, desenvolvendo um algoritmo específico para resolver o problema de encaminhamento de veículos identificado no processo de recolha de resíduos de embalagens domésticas (RED), com possibilidade de aplicar uma abordagem de recolha multi-produto com os veículos. Serão consideradas restrições como duração máxima das rotas, distância máxima a percorrer por rota, capacidade máxima de carga dos veículos e a existência de janelas temporais que determinam os intervalos de tempo durante os quais se deve recolher os resíduos num determinado ponto de recolha;

2. Previsão da geração de resíduos, desenvolvendo métodos estatísticos e de inteligência artificial para se efetuar previsões das quantidades de RED acumuladas em cada contentor de cada ecoponto, possibilitando assim a determinação dos ritmos de enchimento, do estado de enchimento a cada momento, e ainda dos níveis de prioridade de recolha;

3. Aplicação de modelos de análise de decisão multi-critério, para avaliação da influência de diferentes objetivos e indicadores de performance associados à recolha seletiva, de modo a auxiliar a escolha das melhores soluções ao nível da otimização de rotas.

A modelação do problema real de encaminhamento de veículos na recolha seletiva não pode assentar unicamente nos princípios básicos do TOP, pois estamos perante um problema com contornos bem mais complexos. De modo a se alcançarem melhorias na eficiência das rotas de recolha, sugere-se um novo modelo para o problema em questão, ao qual se atribui o nome de Problema de Orientação de Equipas para Recolha Multi-Produto com Restrição de Capacidade e duplas Janelas Temporais, ou em inglês *Capacitated Team Orienteering Problem with double Time Windows and Multi-Product Collection* (CTOPdTW-MPC). De acordo com o nosso melhor conhecimento este problema nunca foi apresentado na literatura.

2.4 Um Sistema de Apoio à Decisão para a Gestão do Processo de Recolha de Resíduos para Reciclagem

2.4.1 Componentes do sistema de apoio à decisão

No âmbito deste projeto de investigação, um dos objetivos consiste no desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão (SAD) para auxiliar os gestores a encontrar soluções apropriadas para diversos problemas de gestão de recursos e de planeamento de rotas no âmbito do processo de recolha de resíduos para reciclagem. Um SAD é um sistema de informação que suporta atividades de tomada de decisão, e inclui ferramentas que ajudam a identificar a melhor solução para um problema específico. Um SAD pode incluir diversos módulos de processamento de informação. Neste projeto de investigação, o conceito de SAD que se propõe inclui três módulos: 1) módulo de previsão da geração de resíduos 2) módulo de otimização de rotas; 3) módulo de análise de decisão multi-critério.

Em termos práticos, o protótipo de SAD que se pretende desenvolver deve incluir um conjunto de algoritmos para otimização de rotas, um modelo de previsão que permita determinar o ritmo de enchimento dos contentores de ecopontos, e um *software* de análise de decisão multi-critério (ADMC).

2.4.2 Funcionamento geral do sistema

Em termos de funcionamento geral do SAD, a produção de soluções para o problema da recolha de RED para reciclagem segue uma sequência específica de processamento de dados e envolve todos os módulos do sistema. Uma vez que cada módulo do SAD funciona como uma ferramenta independente, torna-se necessário definir como cada módulo interage com os restantes, como flui a informação e como é processada essa informação para se obter soluções para o problema da recolha de resíduos.

Na Figura 3 é apresentado um esquema que representa o funcionamento geral do SAD proposto. O processo inicia-se com a atuação do módulo de previsão. Este módulo tem como função gerar estimativas do estado de enchimento dos contentores dos ecopontos com base nos respetivos ritmos de enchimento. O nível de urgência de recolha de um contentor é definido com base no seu estado de enchimento e ritmo de enchimento. Uma vez determinado o nível de urgência de recolha para cada contentor, um algoritmo do módulo de otimização de rotas determina um conjunto de rotas de recolha de acordo com um objetivo específico, e atribui

essas rotas a uma frota limitada de veículos. Por fim, se existir necessidade de comparar diferentes cenários de recolha e respetivas soluções obtidas com base em diferentes objetivos e critérios, então podem-se aplicar as ferramentas disponíveis no módulo de análise de decisão multi-critério.

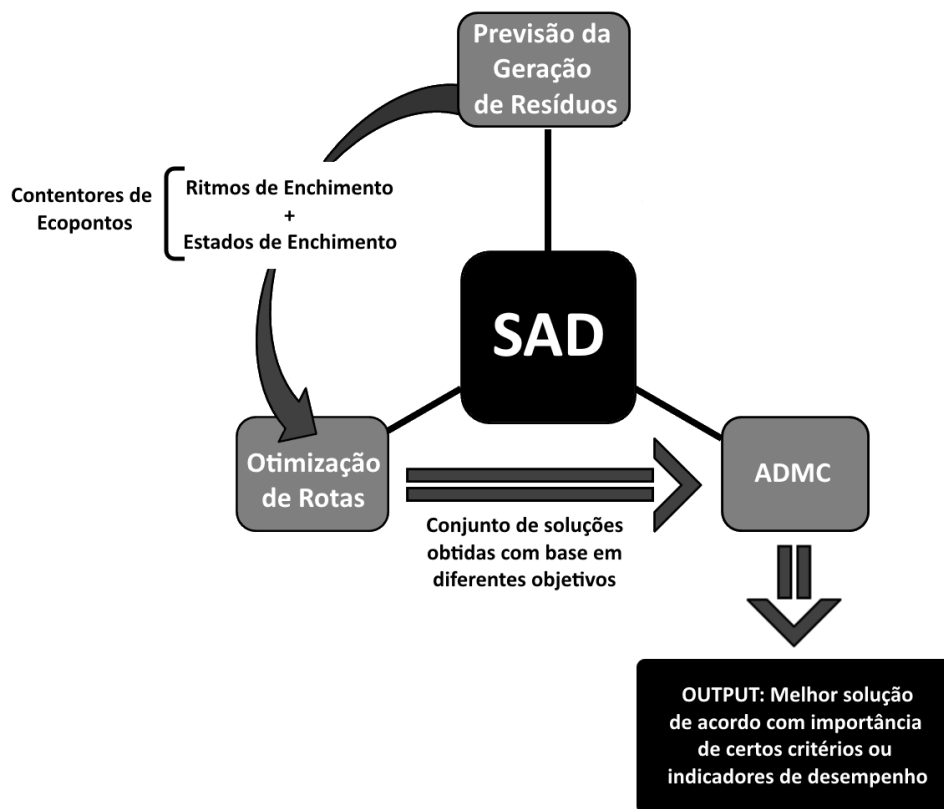


Figura 3 – Esquema representativo do modo de funcionamento do SAD e dos seus módulos.

Nos capítulos seguintes serão apresentados os diferentes módulos que constituem o SAD proposto, e serão testados os desempenhos de cada um individualmente e em modo de funcionamento integrado.

2.5 Caso de estudo: A empresa BRAVAL

A Braval é uma empresa intermunicipal de gestão de resíduos que se estabeleceu como uma associação de seis municípios/concelhos: Braga, Vieira do Minho, Vila Verde, Póvoa do Lanhoso, Amares e Terras de Bouro [20]. A área de atuação da empresa abrange cerca de 1.120 km² e serve uma população de aproximadamente 290.000 habitantes, os quais produzem em média 98.000 toneladas por ano de RSU indiferenciados (1kg per capita/dia). Apesar de ter ocorrido alguma quebra nas quantidades recolhidas de resíduos recicláveis em 2012, a Braval recolheu durante o ano de 2013 cerca de 14.460 toneladas de RED [20]. Destas 14.460 toneladas de

RED, cerca de 43% foi vidro, 43% de papel e cartão, e 14% plástico e metal. A Braval gere uma rede com mais de 1200 ecopontos, onde os cidadãos podem depositar os seus resíduos de embalagens domésticas.

A extensa área de operações da Braval engloba uma mistura de zonas urbanas e zonas mais rurais, e tal facto incita a procura por diferentes estratégias para a gestão da recolha de resíduos. A diferença entre zonas urbanas e zonas rurais sente-se principalmente em termos de desempenho da recolha de resíduos, que se pode traduzir no rácio entre a quantidade recolhida numa rota e a distância total percorrida. Em circuito urbano, uma vez que há maior concentração de ecopontos e a geração de resíduos é maior, um camião necessita de percorrer menos quilómetros do que em circuito rural para recolher igual quantidade de resíduos. Existem diferentes estratégias aplicadas pela Braval de modo a lidar com as diferentes zonas urbanas e rurais. Por exemplo, no circuito de recolha para o concelho de Braga, nas freguesias mais centrais, cada camião recolhe apenas um tipo de resíduos, ou seja, apenas descarrega um tipo de contentor (papelão, embalão ou vidrão), e assim, cada ecoponto é visitado por três camiões com diferentes propósitos de recolha. Já nos restantes concelhos, em que a componente rural é bem maior, e a geração de resíduos é menor, a Braval opta por utilizar camiões para recolher os vidros, e camiões para recolher os papelões e embalões em conjunto. Esta estratégia de misturar dois tipos de resíduos durante a recolha é viável pelo facto de a Braval possuir nas suas instalações uma estação de triagem bastante sofisticada, que permite efetuar uma separação automatizada dos resíduos.

Não existe um requisito para que a Braval tenha de visitar/recolher todos os seus ecopontos a cada dia de trabalho, pois tornar-se-ia uma atividade muito pouco rentável e ineficiente, além de que seria impossível de efetuar devido às limitações em termos de recursos, dado que existe um número limitado de veículos e trabalhadores disponíveis. Deste modo, torna-se necessário selecionar um subconjunto de ecopontos para visitar/recolher a cada dia. Além disso, dado um horizonte de planeamento das recolhas de, por exemplo, uma semana ou um mês, a Braval terá de decidir, com base nos níveis de prioridade de cada ecoponto, quais devem ser visitados, quais podem ser visitados, e quais não serão considerados para inclusão nas rotas de recolha. Após essas decisões, pode seguir-se a concepção de rotas otimizadas para visitar os ecopontos elegíveis para recolha. Esta necessidade de selecionar ecopontos assenta no modelo do TOP. De facto, o problema da recolha de RED pode ser modelado como um *capacitated team orienteering problem with double time windows with multi-product collection* (CTOPTW-MPC), devido às

restrições de capacidade dos veículos, e também porque existe um intervalo de tempo específico denominado janela temporal (*time window*) para cada contentor de ecoponto, durante o qual os resíduos devem ser idealmente recolhidos. Considera-se também a existência de janelas temporais associadas a cada veículo que quais determinam a sua disponibilidade no tempo. A recolha multi-produto adequa-se à estratégia atualmente em vigor na Braval.

Dadas as diretivas estabelecidas pela União Europeia (UE), Portugal tem de alcançar metas exigentes no que respeita à recolha e recuperação de RED. Posto isto, as empresas de gestão de resíduos como a Braval devem procurar ativamente aproximar-se dos padrões de eficiência pretendidos para os países da UE, e para isso acontecer, as práticas de gestão atuais devem ser melhoradas e/ou reformuladas, e novas ideias devem ser exploradas e implementadas.

O objetivo principal deste estudo é o desenvolvimento de melhores soluções e proporcionar mais opções de gestão para os problemas enfrentados pela Braval ao nível da otimização do processo de recolha seletiva, que podem ser estendidas às outras empresas de gestão de resíduos.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Otimização do encaminhamento de veículos

O problema central a ser abordado nesta investigação é a otimização do processo da recolha de resíduos (RED), que de um modo geral incide na gestão eficiente de recursos com vista à minimização de custos. No âmbito recolha de RED, um dos recursos principais utilizados são os veículos. Existe uma frota limitada à qual se atribuem rotas de visita para efetuar recolhas ao longo de uma rede de ecopontos. Existe uma necessidade de otimizar essas rotas de modo a melhorar a sua eficiência em termos de boa gestão de recursos e controlo de custos. Este cenário apresenta claramente um problema de encaminhamento de veículos (PEV), do inglês *vehicle routing problem* ou VRP, que é um tipo de problema muito estudado nas áreas da Logística e da Investigação Operacional. Em termos da Logística, identifica-se o VRP como um problema que requer gestão do fluxo de recursos entre uma origem e um destino, onde objetivos recorrentes são a minimização dos recursos necessários para uma dada tarefa, e a minimização do tempo empreendido para realizar tarefas. No campo da Investigação Operacional, também conhecida como ciência da gestão, o VRP é visto como um problema ao qual se podem aplicar modelos matemáticos, análise estatística e técnicas de otimização para obter soluções ótimas ou sub-ótimas. Objetivos como a maximização de desempenhos ou minimização de custos são o foco da aplicação dos métodos de Investigação Operacional.

No capítulo anterior, na secção 2.3.2 foi referido que o modelo base do VRP pode não ser a via de modelação mais apropriada ao problema da recolha de RED. Existe a necessidade de seguir um modelo mais flexível e ajustado às limitações do problema sob estudo, e identificou-se o *team orienteering problem* (TOP) como o modelo mais apropriado. O TOP é um modelo que tem vindo a ganhar popularidade nas últimas duas décadas, tendo sido introduzido na literatura da área do *routing* por Butt e Cavalier em 1994 sob o nome de *Multiple Tour Maximum Collection Problem* [23]. Mais tarde, em 1996, Chao et al. [26] introduziu um conjunto de instâncias/problemas de teste que se tornaram a mais conhecida base de comparação do desempenho de todos os métodos de resolução desenvolvidos para o TOP. Na descrição clássica do TOP considera-se um conjunto de clientes que devem ser visitados por uma frota limitada de

veículos; cada cliente tem um prémio associado, que é recolhido pelo veículo que o visita; cada cliente só pode ser visitado uma vez e por um só veículo; as rotas dos veículos têm uma duração limitada, o que pode implicar a seleção de clientes a visitar; a seleção é feita pesando as contribuições de cada cliente para o prémio total e para a duração das rotas ou da distância percorrida; o objetivo consiste em maximizar o total de prémios recolhidos pelo conjunto de todas as rotas, cumprindo as limitações impostas à duração das rotas ou distâncias percorridas.

O TOP é um problema de otimização combinatória. Nas áreas da matemática aplicada e da ciência computacional aplicada, a otimização combinatória é um tópico que se foca na procura de soluções ótimas para problemas com um domínio de soluções discretas, que é um conjunto de soluções válidas. O TOP pode ser representado como uma formulação matemática, existem diferentes formas de o resolver. Existem métodos exatos que permitem obter soluções ótimas para o TOP, mas quando são implementados como programas de computador, necessitam de tempos de processamento elevados para obter as soluções ótimas. Em aplicações reais, o tempo é um recurso muito valioso, e em vez dos métodos exatos são habitualmente aplicados métodos de solução aproximada como o métodos heurísticos e metaheurísticos. Estes métodos são rápidos em termos de processamento computacional, e permitem obter soluções de boa qualidade, mesmo quando não alcançam as soluções ótimas. Nos últimos anos, os métodos metaheurísticos têm sido cada vez mais aplicados para resolver o TOP e outras variantes do problema. Alguns exemplos são pesquisa local iterada (*iterated local search* – ILS), pesquisa tabu (*tabu search* -TS), pesquisa de vizinhança variável (*variable neighbourhood search* – VNS), arrefecimento simulado (*simulated annealing*), otimização por colónia de formigas (*ant colony optimization* - ACO), otimização por nuvem de partículas (*particle swarm optimization* - PSO) e algoritmos evolucionários (AE). Segue-se uma revisão da literatura que incide nos métodos de solução para o TOP e suas variantes.

Em 2005, Tang e Miller-Hooks [96] apresentaram o primeiro método de pesquisa tabú para resolver o TOP. A heurística desenvolvida obteve valores excelentes nas instâncias de teste públicas. Mais tarde, em 2007, Archetti et al. [8] desenvolveram dois métodos de pesquisa tabu e dois de VNS. Com estes métodos igualaram os resultados máximos conhecidos e estabeleceram novos valores máximos para muitas das instâncias de teste públicas.

Em 2007, Boussier et al. [19] apresentaram um algoritmo de *Branch&Price* para o TOP, e sendo este um método exato, foram determinados para várias das instâncias de teste os valores ótimos de solução.

Posteriormente, em 2008, Ke et al. [54] apresentaram quatro variantes do método ACO. Um dos métodos provou ter melhor desempenho que o melhor método apresentado por Archetti et al. em [8], obtendo novas soluções máximas e valores de processamento computacional mais baixos.

Em 2009 surgiram duas abordagens propostas por Vansteenwegen et al. em [108] e [109], cujo foco principal consistiu em reduzir os tempos de processamento para resolver o TOP. Uma das abordagens assenta no método de pesquisa local guiada (*guided local search* – GLS), e a outra abordagem é baseada no método VNS (*Skewed Variable Neighbourhood Search* - SVNS). O SVNS superou o GLS, e ambos os métodos produzem soluções de elevada qualidade e em menos tempo que os restantes métodos na literatura.

Em 2010, Souffriau et al. [94] publicaram duas variantes de um algoritmo do tipo GRASP (*Greedy Randomised Adaptive Search Procedure*) com Path Relinking. Ambos produziram soluções de alta qualidade, e alguns novos valores máximos nas instâncias de teste. Um dos algoritmos tem desempenho comparável ao apresentado pelas soluções em [8] e [54]. Os autores destacam o facto de ser um método vantajoso pois além de eficiente e efetivo, é simples de implementar e quase não contém parâmetros de funcionamento. Ainda em 2010, Hermann Bouly et al. [18] propuseram um método híbrido baseado num algoritmo genético ao qual se chamou *memetic algorithm* (MA). Este MA demonstrou ser bastante competitivo em relação aos métodos apresentados anteriormente, superando plenamente alguns deles com novos valores máximos nos testes públicos.

Em 2012, Sevkli e Sevilgen [90] desenvolveram um algoritmo do tipo PSO para o TOP. O método de solução é rápido e apresenta um desempenho comparável aos melhores métodos até então desenvolvidos.

Durante o ano de 2013 foram publicados trabalhos de vários autores em que se apresentaram métodos para resolver o TOP. Um método baseado em PSO foi proposto por Dang et al. [29], e conseguiu produzir soluções com valores máximos em algumas instâncias de teste. Outro método bem-sucedido foi apresentado por Kim et al. [56], e consiste num algoritmo de pesquisa local designado por *augmented large neighbourhood search*. Por fim, Shih-Wei Lin [62] apresentou um algoritmo baseado em arrefecimento simulado (SA), e alcançou novos valores de prémio máximos nas instâncias públicas de teste.

No TOP, quando os clientes possuem janelas temporais para a realização da visita, o problema passa a designar-se *team orienteering problem with time windows*, ou simplesmente

TOPTW. As janelas temporais marcam os intervalos de tempo durante os quais um cliente está disponível para ser visitado. Um TOP com janelas temporais é um modelo que se adequa ao problema da recolha de RED, pois um ecoponto pode ter um período específico para ser visitado e recolhido atendendo ao nível de enchimento. Existem vários métodos apresentados na literatura que foram desenvolvidos para resolver o TOPTW. Alguns dos mais importantes são referidos em seguida.

Em 2009, Vansteenwegen et al. [107] aplicaram um método ILS ao TOPTW que em testes com instâncias públicas provou ser rápido e eficiente a produzir soluções. Mais tarde, em 2010, Tricoire et al. [100] propuseram um algoritmo do tipo VNS que englobava um algoritmo de solução exata. As experiências que realizaram demonstraram o elevado nível de qualidade de soluções obtidas com este método.

Em 2011, Montemanni et al. [70] avançaram com um sistema de colónia de formigas (*ant colony system* - ACS) como método de resolução do TOPW e excelentes resultados foram obtidos nas instâncias de teste públicas.

Em 2011 e 2012, dois métodos foram propostos por Labadie et al. [59][60]. O método apresentado em [59] assenta num algoritmo híbrido entre um algoritmo evolucionário de pesquisa local e um algoritmo do tipo GRASP. O método em [60] incide na metodologia VNS. Com ambos os métodos foram alcançados bons desempenhos, tendo-se obtido novos valores máximos nas instâncias públicas. Ainda em 2012, Lin e Yu [63] apresentaram um método SA que se mostrou eficaz nos testes públicos e fixou novos valores máximos.

Em 2013, Souffriau et al [95] combinaram as metodologias ILS e GRASP e obtiveram um método de solução híbrido que superou os outros métodos publicados até essa altura em vários testes em instâncias públicas.

Em 2014, Hu e Lim [47] revelaram um método heurístico com três componentes: pesquisa local, arrefecimento simulado, e um procedimento de recombinação de rotas. Vários novos valores de prémio máximo foram obtidos, o que reforça a posição desta abordagem entre os melhores métodos de resolução para o TOPTW.

Uma variante do TOP que tem vindo a ser estudada ultimamente é o CTOP (*capacitated team orienteering problem*), em que se incluem limitações na capacidade de carga dos veículos. Esta variação do modelo TOP é interessante para o problema da recolha de resíduos, uma vez que a capacidade de carga de um veículo determina a quantidade máxima de resíduos que pode recolher em cada rota. O CTOP foi apresentado pela primeira vez na literatura em 2009 por

Archetti et. al. [7], onde os autores exploram a aplicação do método de pesquisa tabu e do método VNS. Os autores definiram um conjunto de instâncias de teste que passaram a ser uma referência para comparação com outros métodos aplicados ao CTOP. Os métodos apresentados obtiveram a solução ótima em grande parte das instâncias de teste.

Em 2013, Luo et. al. [64] conseguiram igualar e melhorar os valores máximos estabelecidos para as instâncias de teste do CTOP utilizando um método designado por *adaptive ejection pool with toggle-rule diversification approach*. No mesmo ano, Tarantilis et al. [97] apresentaram em um método *Bi-level Filter-and-Fan* que se demonstrou competitivo em relação aos restantes métodos apresentados.

Ainda 2013, Archetti et. al. [6] focaram-se na variante do CTOP com serviço incompleto, e aplicaram um algoritmo *Branch&Price*. Em 2014, a variante CTOP com entregas parciais foi apresentada por Archetti et al. [9], e a resolução ficou a cabo de um algoritmo *Branch&Price* e de um método heurístico híbrido com base em pesquisa tabu.

3.2 Encaminhamento de veículos no contexto da recolha de resíduos

Existem muitos mais trabalhos realizados em torno de problemas de encaminhamento de veículos no contexto da recolha de resíduos. Uma revisão muito atual da literatura desta temática foi feita por Beliën et al. [15] em 2014.

Em 2004, Teixeira et al. [100] apresentaram um método de planeamento de rotas de recolha de RED para reciclagem usando um conjunto de métodos heurísticos.

Em 2005, Karadimas et al. [52] incluíram no seu método de otimização de rotas de recolha de resíduos um algoritmo do tipo ACO. No mesmo ano, Sahoo et al. [88] apresentou um método de solução integrada para gestão da recolha de resíduos com base num sistema de informação geográfica, o qual permitiu poupanças muito significativas nos custos operacionais de uma empresa que recolhe resíduos.

Em 2006, Kim et al. [57] modelaram o problema da recolha de resíduos com um VRP com janelas temporais (VRPTW), o qual é resolvido recorrendo a um algoritmo de inserção. Também em 2006, Nuortio et al. [74] desenvolveram um método VNS para otimizar as rotas de recolhas de resíduos e a calendarização dessas rotas.

Em 2008, Bautista et al. [12] focaram-se num problema de recolha de resíduos modelado como um problema de encaminhamento por arcos (*arc routing problem*) com restrição de

capacidade. Foi aplicado um método de solução baseado em ACO e VNS, e foram alcançadas melhorias no desempenho quando se aplicaram as soluções em contextos reais.

No ano de 2008, o autor Manuel Oliveira [73] apresentou na sua tese de doutoramento uma abordagem baseada na aplicação de programação inteira binária para otimizar circuitos de recolha de resíduos em zonas urbanas.

Em 2009, Ramos et al. [78] estudaram um problema de recolha de RED para reciclagem, onde é aplicado o modelo VRP em que se considera recolha multi-produto e a existência de múltiplos depósitos para retorno dos veículos e descarga dos resíduos (*Multi-Product Multi-Depot VRP – MP-MD-VRP*). Um método heurístico específico foi desenvolvido para gerar soluções, as quais são comparadas com as soluções ótimas geradas com um método exato de *Branch&Bound*. Um problema semelhante foi estudado por Ramos et al. [80], desta vez aplicando um modelo *Multi-Product Multi-Depot Periodic VRP (MP-MD-PVRP)*. O método de solução desenvolvido assenta num modelo de programação linear mista.

No ano de 2009, Rita Silva [92] apresentou na sua tese de mestrado uma abordagem de otimização de circuitos de recolha de resíduos urbanos por aplicação do *software NetworkAnalyst* integrado num sistema de informação geográfica (SIG).

Em 2011, Ana Beijoco [14] apresentou a tese de mestrada intitulada *Otimização de um Sistema de Recolha e Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos*, onde o caso de estudo foi a empresa Amarsul que efetua recolha de RSU. A autora elaborou um ciclo de recolhas com circuitos otimizados por tempo e/ou distância que se pode permitir reduções significativas nos custos com a recolha de RSU em relação ao sistema utilizado pela Amarsul.

Outro caso de otimização de rotas de recolha de resíduos foi apresentado por Buhrkal et al. [22] em 2012, onde um modelo VRPTW é aplicado, e como método de solução utilizou-se um algoritmo de pesquisa de vizinhança adaptativa. O método permitiu melhorar o desempenho de uma empresa que recolhe resíduos.

Em 2013, Hemmelmayr et al. [44] publicaram um estudo sobre um problema de recolha de resíduos para o qual propuseram um modelo de VRP periódico com entrepostos intermédios. Como método de solução foi desenvolvido um método híbrido de VNS e programação dinâmica.

Também em 2013, Rafiei et al. [77] propuseram a modelação de um problema de recolha de resíduos como um VRP multi-zona em que se considera a utilização de uma frota heterogénea de veículos. Um algoritmo de programação inteira mista foi usado para obter soluções para o problema.

Ainda em 2013, Ramos et al. [79] focaram-se num problema de recolha de resíduos de óleos alimentares usados. O problema foi modelado como um MD-VRP com rotas inter-depósito mistas. Soluções para o problema foram produzidas com recurso a um algoritmo de programação inteira mista.

Em 2014 foi publicado por Henke et al. [45] um artigo provisório sobre a recolha de vidro para reciclagem. O problema implica que um veículo recolha diferentes tipos de vidro usando múltiplos compartimentos na carga do veículo (um para cada tipo de vidro). O modelo do problema toma o nome de *multi-compartment VRP with flexible compartment sizes*. Um método VNS é aplicado para resolver o problema.

3.3 Previsão da geração de resíduos

A previsão dos ritmos de geração de resíduos é importante para a concepção e desenvolvimento das infraestruturas de gestão de resíduos, e também para a implementação de processos logísticos para a recolha de resíduos.

No âmbito do processo de recolha de resíduos para reciclagem, as empresas pretendem saber a frequência correta com que devem passar em cada ecoponto da sua rede de operação, de modo a evitar gastos desnecessários em deslocações a ecopontos onde a quantidade de resíduos acumulados nos contentores não é suficiente para justificar uma recolha. Idealmente, aquando da recolha de um ecoponto, os contentores deveriam estar completamente cheios ou o mais próximo possível do limite da capacidade. A aproximação das empresas a este ideal pode ser alcançada com a aplicação de modelos de previsão para antever a geração de resíduos em cada ecoponto, e por conseguinte determinar os respetivos ritmos de enchimento.

A determinação de potenciais ritmos de enchimento pode ser muito útil numa fase de concepção de uma rede de recolha de resíduos. Por exemplo, os ecopontos podem ser colocados num determinado local ao invés de outro tendo por base de comparação os prováveis ritmos de enchimento em cada um dos locais, os quais foram previamente determinados com um modelo de previsão.

Com base nas previsões das quantidades de resíduos acumuladas nos contentores dos ecopontos, é possível aplicar os princípios do *Team Orienteering Problem* ao processo de encaminhamento dos veículos que efetuam a recolha desses resíduos. Ao se identificar o estado de enchimento e ritmo de enchimento de cada contentor de ecoponto, pode-se atribuir o

respetivo nível de prioridade de recolha, o qual traduz a urgência com que cada contentor deve ser visitado e esvaziado.

Existe uma enorme variedade de métodos utilizados para efetuar a previsão da geração de resíduos. Numa revisão efetuada por Beigl et al. [13] revelou-se que os métodos usados para a previsão da geração de resíduos podem ser identificados de acordo com sete categorias: comparação de grupo, análise por correlação, regressão linear simples, regressão linear múltipla, análise *input-output*, análise de séries temporais, e *system dynamics*.

Na revisão efetuada por Beigl et al. [13], afirma-se que a previsão da geração de resíduos é melhor conseguida com as metodologias de análise de séries temporais, análise por correlação e regressão linear. Para se efetuarem as previsões é necessário identificar fatores que contribuem para a geração de resíduos, de modo a atuarem como variáveis de entrada nos modelos de previsão. Em relação a esses fatores, Wang e Nie [110] afirmam que os mais importantes são o crescimento da população urbana e do produto interno bruto. De modo a efetuar previsões com base em mais fatores do que os mencionados, modelos de regressão têm sido aplicados desde 1950. Grossman et al. [42] incluíram num modelo de regressão linear fatores como aumento populacional, nível de rendimentos e tipo de habitação. Considerando fatores como o aumento do nível de rendimentos e da qualidade de vida, o lixo tende a mudar mais em termos de composição do que em quantidade gerada. Outros fatores que afetam a geração e a composição do lixo são o nível de vida, a média de rendimentos das pessoas, alterações climáticas, hábitos de vida, nível de educação, religião, atitudes públicas e sociais, entre outros [11][67].

Os modelos de previsão com base em séries temporais são uma boa opção de modelação quando existe uma abundância de dados históricos. Estes modelos não são influenciados por fatores de carácter demográfico e/ou sócio-económico. A natureza dinâmica associada às séries temporais sugere a aplicação de métodos não-lineares como redes neuronais artificiais, à semelhança do que é observado em [1][5][71][91][113]. Uma vantagem na utilização de séries temporais é a capacidade de prever variações sazonais na geração de resíduos. A análise de séries temporais inclui métodos como média móvel, alisamento exponencial, média móvel autorregressiva (ARMA), média móvel autorregressiva integrada (ARIMA), extrapolação, entre outros. Exemplos de aplicação de análise de séries temporais são apresentados em seguida.

Rimaityte et al. [84] efetuaram previsão da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) usando uma combinação de modelo ARIMA, alisamento exponencial e regressão linear.

Nos trabalhos de Noori et al. [71], Zade et al. [113], Abdoli et al. [1], Shahabi et al. [91] e Antanasijević et al. [5], a característica comum é aplicação de modelos de redes neuronais artificiais para prever a geração de RSU. No trabalho de Noori et al. é feita uma comparação entre previsões com modelo de rede neuronal e modelo de regressão linear múltipla. O desempenho do modelo de rede neuronal foi superior ao de regressão. No trabalho de Zade et al. [113], utilizaram-se séries temporais e são sublinhadas vantagens da utilização de redes neuronais face a métodos mais tradicionais. O mesmo é afirmado por Abdoli et al. [1], que também utilizaram séries temporais e afirmam que o método desenvolvido permite reduzir as incertezas e permite aumentar a exatidão das previsões a longo prazo. No trabalho de Shahabi et al. [91] também se usaram séries temporais. Antanasijević et al. [5] focaram-se na previsão da geração de resíduos à escala nacional (Bulgária e Sérvia) e concluíram que a aplicação de redes neuronais foi bem-sucedida, tendo-se obtido bons níveis de exatidão nas previsões.

Bach et al. [10] utilizaram um modelo de regressão linear múltipla para fazer previsões da geração de resíduos do tipo cartão. Os autores desenvolveram o modelo com base em fatores socioeconómicos e fatores logísticos. Contudo, a previsão é feita apenas em termos totais de quantidade de resíduos gerada, e não ao nível da geração em cada ponto de recolha de resíduos.

A tese de mestrado trabalho de Mónica Vale [106] é um trabalho que se aproxima dos objetivos que se pretendem atingir nesta investigação de doutoramento. A autora utilizou técnicas de mineração de dados para construir um modelo de previsão com base em séries temporais e um modelo de *clustering*. Os modelos foram usados para determinar a frequência ideal de recolha de contentores de resíduos, como por exemplo os usados em ecopontos, com base em dados históricos de quantidades recolhidas e nível de enchimento dos contentores aquando de recolhas anteriores.

Após rever os exemplos de estudos sobre previsão da geração de resíduos aqui apresentados e muitos outros não incluídos, tornou-se claro que, excetuando o trabalho de Mónica Vale [106], nenhum deles era focado numa análise ao nível de detalhe pretendido para esta investigação. Nesses estudos são feitas previsões com outros propósitos na área da gestão de resíduos, ao passo que neste trabalho se pretende obter previsões da geração de resíduos em cada ecoponto, e utilizar essa informação a nível operacional, de modo a contribuir para a otimização do processo de recolha de resíduos. O estudo que se pretende desenvolver foca-se num nível de detalhe mais profundo que o habitualmente observado na literatura, e por isso requer uma

abordagem de solução mais específica deste problema de previsão. Contudo, muitos trabalhos disponíveis na literatura ajudam a perceber a influência de certos fatores que contribuem para a geração de resíduos, e ainda o desempenho de certos métodos de solução quando se usam certos tipos de dados.

3.4 Análise de decisão multi-critério aplicada a problemas de encaminhamento de veículos

Ao longo dos anos, a ciências da decisão têm sido cada vez mais aplicadas no âmbito da gestão de recursos de forma a se alcançar maior sucesso no mundo empresarial. De forma a evitar perdas e a aumentar lucros quando se utilizam recursos, as empresas tendem a depender das decisões levadas a cabo pelos seus gestores. O processo de tomada de decisão ocorre normalmente com base na análise de vários critérios, e existem por vezes objetivos concorrentes que entram em conflito ou induzem resultados divergentes ao tentar atingir a mesma meta. Esses resultados divergentes tanto podem ser complementares ou criar problemas quando se tenta decidir qual a melhor forma de atuar para concretizar uma determinada tarefa ou projeto. Critérios que normalmente entram em conflito são os custos e as medidas de qualidade ou indicadores de desempenho. Tentar alcançar um bom equilíbrio entre critérios importantes implica pesar as suas contribuições e as consequências adversas para o objetivo final, e optar pela melhor alternativa para essa situação específica. Este processo requer estruturação do problema de uma forma apropriada para reduzir a sua complexidade e permitir tomar melhores decisões.

Os métodos de análise de decisão multi-critério incluem modelos e metodologias que providenciam o agente de decisão (AD) com ferramentas que permitem resolver problemas de decisão e planeamento. No entanto, quando existem vários critérios a considerar, é bastante difícil, se não impossível, determinar uma única “melhor solução”. Para identificar uma melhor solução global, o AD deve incluir as suas preferências no processo de decisão, pois a importância atribuída a cada critério depende do AD.

O surgimento da era dos computadores permitiu o desenvolvimento de *software* para implementar vários modelos e métodos de resolução de problemas de tomada de decisão com múltiplos critérios. Existem atualmente inúmeros *software* comerciais de propósito-geral ou mais específicos que permitem resolver problemas em que é necessário efetuar análise de decisão multi-critério (ADMC). Estas ferramentas são extremamente úteis para diferentes cenários de

gestão. Frequentemente, os *software* de ADMC são incluídos em sistemas de software de maiores dimensões designados por sistemas de apoio à decisão (SAD). Um SAD é o sistema de informação que suporta atividades de tomada de decisão e auxilia na determinação da melhor decisão em vários níveis: 1) gestão, 2) operações, e 3) planeamento. Um SAD é normalmente uma ferramenta de *software* interativa que combina dados de diferentes fontes e em diferentes formatos, e apresenta ao utilizador (p.ex. o AD) informação útil através de interfaces gráficas que ajudam a resolver problemas de tomada de decisão.

Existem vários métodos de ADMC disponíveis na literatura. Uma comparação e análise aprofundada desses métodos foi feita por Belton e Steward [16]. Existem também várias ferramentas que foram desenvolvidas para implementar métodos de ADMC. No ano de 2005, um extenso levantamento dessas ferramentas e uma comparação entre elas foi apresentada por Weistroffer et al. [111]. Baseado nesse trabalho, Seixedo e Tereso [89] atualizaram em 2010 a lista de ferramentas apresentadas, e desenvolveram um *software* de apoio à decisão multi-critério para selecionar *software* ADMC com base no método AHP (analytic hierarchy process) [87].

Após uma ampla revisão da literatura no âmbito da aplicação de ADMC em SAD para problemas de encaminhamento de veículos ao longo da última década, foram selecionados vários trabalhos interessantes nesta área científica.

Em 2002, o autor Jacek Zak [114] focou-se em vários problemas enfrentados por empresas de transportes. Um dos problemas incidida na aceitação ou rejeição de encomendas baseadas na definição de um preço mínimo para as encomendas e a atribuição de veículos às encomendas. Este problema multi-objetivo foi resolvido pela aplicação do método ELECTRE III.

Em 2005, Cavar et al. [25] aplicaram o método AHP para seleção do melhor algoritmo de resolução do VRP numa situação em que era necessário considerar fatores como o número de veículos a utilizar, o tempo necessário para calcular as rotas e a distância total percorrida pela frota de veículos.

Mais tarde, em 2008, uma aplicação interessante de ADMC aplicada ao *routing* foi realizada por Tavana et al. [99]. O objetivo passava por modelar um problema que implicava a atribuição de aeronaves a missões. O modelo ADMC foca-se em quatro objetivos em competição, considerados para a avaliação da atribuição aeronave-destino. Para resolver o problema foi empregue o método AHP.

Em [48], os autores Hwang et al. pretendiam otimizar o *design* de um centro de abastecimento para serviço público, e aplicaram um método Fuzzy-AHP para decidir o tipo de instalações, e depois usaram o modelo do VRP para identificar o número e localização de instalações. Foram usados critérios como o nível de distribuição, nível de serviço, custo de abastecimento, satisfação dos clientes, transporte e serviço de informação.

Ainda em 2008, Jolai e Aghdaghi [51] apresentaram uma aplicação do método de *goal programming* (GP) para modelar um VRP de um só veículo mas com múltiplas rotas. O modelo foi resolvido através de um método heurístico baseado no algoritmo do caminho mais curto com restrições nos recursos.

Mais tarde, em 2010, Tavana e Bourgeois [98] focaram-se no problema de planeamento operacional e navegação de veículos submarinos autónomos. Um sistema de apoio à decisão para múltiplos critérios dinâmicos foi desenvolvido, e os autores aplicaram métodos de ADMC, a par de outras metodologias, para auxiliar no planeamento de missões executadas pela Marinha dos Estados Unidos da América.

Uma combinação dos métodos GP e algoritmo genético foi empregue por Ghoseiri e Ghannadpour [40] para modelar e resolver um VRP multi-objetivo. Os objetivos considerados foram a minimização do número de veículos da frota e a minimização da distância total a percorrer, onde são cumpridas restrições como capacidade e janelas temporais.

Um trabalho mais recente foi apresentado em 2012 por Ries e Ishizaka [81]. Os autores desenvolveram um SAD para resolver um problema de encaminhamento de aeronaves não-tripuladas no âmbito de vigilância marítima. Os autores aplicaram métodos como AHP e PROMETHEE para avaliar os cenários operacionais produzidos pelo algoritmo de encaminhamento.

Também em 2012, uma combinação dos métodos AHP e TOPSIS foi apresentada por Yilmaz e Aylak [112], como um método de solução de rotas alternativas para um VRP.

3.5 Conclusões

Conforme já foi referido, outras publicações foram consultadas no âmbito deste trabalho, mas decidiu-se pela sua não inclusão na parte de revisão bibliográfica por questões de espaço ou relevância. Entende-se no entanto que foram estudados os trabalhos mais importantes para suportar este projeto. Dado o dinamismo inerente às áreas da gestão os resíduos e da otimização, é praticamente contínuo o surgimento de novos trabalhos. Assim, recomenda-se ao

leitor interessado nas referidas áreas que efetue uma atualização da bibliografia, o que facilmente é conseguido recorrendo aos motores de indexação de publicações científicas atualmente disponíveis.

CAPÍTULO IV

FERRAMENTAS PARA A PREVISÃO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

Uma estratégia que pode contribuir para a otimização ou melhoramento do processo de recolha de resíduos de embalagens domésticas (RED) assenta na aplicação de modelos de previsão que permitam estimar as quantidades de RED acumuladas em cada contentor de cada ecoponto, e por conseguinte estimar o ritmo de enchimento de cada contentor.

A recolha dos RED acumulados nos ecopontos constitui um problema de encaminhamento de veículos, o qual consiste em procurar soluções que permitam determinar rotas mais eficientes em termos de distâncias percorridas e custos associados. Contudo, melhoramentos na eficiência das rotas de recolha podem ser alcançados através de um planeamento mais rigoroso da execução dessas rotas. Existe uma necessidade de desenvolver um agendamento mais apropriado das recolhas dos ecopontos, isto é, determinar a frequência com que um veículo irá passar em cada ecoponto da rede para recolher resíduos. Esta frequência de visitação (e recolha) está relacionada com o ritmo de enchimento de cada ecoponto, o qual indica a quantidade de resíduos que se acumula em cada ecoponto num determinado intervalo de tempo, por exemplo um dia. Contudo, como cada ecoponto possui um ou mais contentores, em que cada um é designado para armazenar um determinado tipo de RED (papel/cartão, plástico/metal, vidro, etc.), e como os diferentes tipos de resíduos se vão acumulando em ritmos diferentes uns dos outros, torna-se necessário determinar o ritmo de enchimento de cada contentor em cada ecoponto. Uma vez determinados, esses ritmos de enchimento vão permitir elaborar uma calendarização de todas as recolhas a efetuar para cada contentor de cada ecoponto.

4.1 Modelação do problema

As empresas que efetuam recolha de resíduos podem efetuar um melhor planeamento das rotas de recolha quando têm acesso a previsões de confiança e com elevado grau de exatidão. Existem diversas técnicas e métodos de previsão que permitem modelar este problema, e na literatura desta área científica existem muitos exemplos de aplicações a problemas de gestão da geração de resíduos.

De entre os diversos métodos de previsão, existe o grupo dos métodos quantitativos. Estes métodos dividem-se em dois tipos: métodos de séries temporais e métodos causais ou econométricos. Nos métodos baseados em análise de séries temporais assume-se que os valores futuros que se pretendem prever dependem dos valores passados. Os modelos de previsão de séries temporais utilizam uma série de valores históricos, referentes a um certo período de tempo, para extrair padrões ou combinações de padrões que se apontam como recorrentes ao longo do tempo [65]. Esses padrões identificados podem ser extrapolados para efetuar previsões de valores futuros para um período de tempo de igual dimensão ao período que compreende os dados históricos utilizados. Por exemplo, se se pretende prever o número de vendas semanais de um determinado produto, irão utilizar-se os dados das vendas semanais antecedentes. Uma série temporal baseia-se em sequências de pontos igualmente espaçados ao longo do tempo, sejam por exemplo períodos semanais, mensais, trimestrais, anuais, etc. A previsão baseada em séries temporais centra-se apenas na utilização de valores observados no passado para prever o futuro, e não se consideram variáveis ou fatores que sejam potencialmente relevantes para explicar a evolução dos valores que se pretendem prever [43]. O método da previsão com séries temporais trata o sistema de previsão como uma caixa negra, e não se foca em identificar os fatores que influenciam o seu comportamento [65].

Os métodos de previsão do tipo quantitativo referem-se aos métodos causais. Estes métodos assentam numa abordagem diferente das séries temporais, uma vez que o objetivo é efetuar previsões em função de um fator ou de um conjunto de fatores que influenciam os valores da variável que se pretende antever. Uma situação é adaptar um modelo de previsão a uma série temporal, e outra situação bem diferente é identificar variáveis que se relacionam com a série de dados temporais e desenvolver um modelo que exprime como todas essas variáveis estão relacionadas [65].

Um método causal muito conhecido e amplamente aplicado é a regressão linear (RL). Na RL assume-se que existe uma relação entre a variável cujo valor que se pretende prever, a variável dependente, e uma ou mais variáveis designadas por variáveis independentes. A relação entre a variável dependente e as variáveis independentes é considerada linear. Ao aplicar RL, os dados são modelados usando funções lineares de previsão (*linear predictor functions*), e a partir desses dados são estimados os valores dos parâmetros ou coeficientes do modelo.

No âmbito dos métodos de previsão, têm ganho preponderância nas últimas décadas os métodos de inteligência artificial, de entre os quais se destacam os métodos baseados em redes

neurônais artificiais (RNA). As redes neurônais são capazes de detectar padrões entre dados e determinar relações complexas não-lineares entre dados. As RNA funcionam quase como um sistema de caixa negra, onde dados de entrada são processados e produzem determinados dados de saída de acordo com uma aprendizagem ocorrida previamente, a qual constitui o elemento de inteligência artificial. Uma possibilidade de aplicação dos modelos de previsão com RNA consiste em prever valores futuros de certas variáveis (de saída) em função de outras variáveis (de entrada), podendo neste caso serem designadas por variáveis dependentes e variáveis independentes.

Neste trabalho de investigação, o desenvolvimento dos modelos de previsão para a geração de resíduos visa atingir os seguintes objetivos:

1. Identificar fatores relevantes para a geração de RED e determinar a sua significância quando aplicados em modelos de previsão da geração de resíduos (RED).
2. Prever o número de recolhas a efetuar por mês ou por ano em cada contentor de ecoponto, com fim a determinar o ritmo a que se acumulam resíduos em cada contentor (ritmo de enchimento). Posteriormente, para cada contentor será determinado o respetivo nível de prioridade de recolha, o qual se baseia no ritmo de enchimento e no estado atual de enchimento de cada contentor. Os valores dos níveis de prioridade de recolha serão posteriormente utilizados pelo modelo de otimização de rotas, onde serão determinantes no processo de seleção de contentores a incluir em cada rota.

4.1.1 Classificação quanto ao tipo de modelo de previsão

Os modelos de previsão que serão desenvolvidos para antever as quantidades de resíduos gerados em ecopontos podem ser classificados em diferentes aspectos relativamente a quatro critérios de classificação de características. Beigl et al. [13] publicaram um artigo de revisão de literatura sobre métodos e modelos de previsão no contexto da geração de resíduos, e nesse artigo referem o seguinte: “A systematic review of 45 waste generation modelling approaches revealed four characteristic classification criteria: regional scale, type of modelled waste streams, type of independent variables and modelling method.”, ou seja, os autores apontam que os modelos de previsão no contexto da geração de resíduos podem ser classificados quanto:

- à escala regional;
- ao tipo de fluxos de resíduos modelados;

- ao tipo de variáveis independentes;
- ao tipo de método de modelação.

Neste contexto, a escala regional refere-se à dimensão da unidade de amostra mais pequena identificável observada em cada estudo sobre a qual se recolhem dados relativos à geração de resíduos. Os trabalhos analisados por Beigl et al. [13] variam a sua escala regional desde a escala de residência individual (*household scale*) até à escala nacional, passando pelas escalas de zona residencial (*settlement area*) e escala distrital. Em termos de escala regional, a abordagem de modelação escolhida para ser explorada nesta tese encontra-se entre a escala de residência individual e a escala de zona residencial.

Uma vez que o estudo que se pretende realizar incide na análise ao nível de cada ecoponto, e dado que estes normalmente abrangem um conjunto de várias habitações, a escala regional do modelo de previsão a desenvolver é mais próxima da escala de zona residencial. De acordo com o referido em [13], para este tipo de escala regional, as fontes de dados para as variáveis dependentes assentam em estatísticas sobre as quantidades recolhidas de resíduos. Já para determinar as variáveis independentes do modelo utilizam-se questionários por habitação, informações de censos, e ainda documentação relacionada com as atividades realizadas no âmbito da gestão de resíduos e infraestruturas associadas. No caso da investigação aqui apresentada, as fontes de dados para as variáveis independentes não se baseiam em informações obtidas via questionários, tendo-se optado apenas por recorrer a dados relativos às atividades de gestão da recolha de resíduos para reciclagem levadas a cabo pela empresa Braval, e também por informações obtidas nos censos mais recentes. Além disso, foram também utilizadas informações de carácter social e económico, retiradas de fontes acessíveis na internet.

Relativamente ao tipo de fluxos de resíduos, e seguindo os conceitos enunciados em [13], estes fluxos podem ser classificados como fluxos de recolha. Mais especificamente, tenciona-se modelar fluxos de resíduos separados consoante a origem (*source separated waste streams*) tais como papel, cartão, plástico, metal e vidro.

Uma abordagem que será explorada para construir o modelo de previsão consiste em definir a variável dependente como o número total de recolhas a efetuar por mês ou por ano para cada contentor em ecoponto. Em termos de fontes de informação utilizadas para quantificar a variável dependente, estas baseiam-se simplesmente nos dados que constam nos relatórios de recolhas da Braval. Quanto às variáveis independentes, que são os fatores utilizados para a prever o

número de recolhas, estas serão determinadas com base em dados facilmente acessíveis, como informações relativas às características dos ecopontos (capacidade dos contentores, localização, etc.), bem como indicadores socioeconómicos e demográficos simples. Dados adicionais poderão ser obtidos utilizando um sistema de informação geográfica (SIG) ou registos de informação relativas a atividades económicas e sociais.

4.1.2 Recolha de informação necessária aos modelos

A escolha de metodologias para construção de modelos de previsão depende em grande parte do tipo de dados que se utilizam para tal. Deste modo, é importante primeiro analisar o tipo de informação que está disponível para a construção do modelo de previsão da geração de resíduos, para posteriormente se escolher quais as técnicas ou métodos que será interessante explorar. A empresa Braval disponibilizou acesso a registos das recolhas efetuadas nos seis municípios em que opera. Estes registos consistem de relatórios diários em formato de papel, e em cada um consta uma lista de ecopontos visitados por um determinado camião de recolha. Em cada relatório é também especificado o nível de enchimento de cada contentor de ecoponto em termos de percentagem relativamente à respetiva capacidade total volumétrica. Os valores anotados de nível de enchimento seguem a seguinte escala:

- Vazio: 0%;
- Menos de meio: 25%;
- Meio cheio: 50%;
- Mais de meio: 75%;
- Cheio: 100%.

Estes valores de enchimento são anotados pela equipa de funcionários que operam o veículo de recolha, e a medição que ocorre é puramente baseada na percepção visual do observador, e por isso o grau de exatidão está sujeito a erros de cariz humano. Deve-se encarar estes valores como simples aproximações aos valores reais. Após serem recolhidos os resíduos durante uma rota, assim que o camião retorna à Braval, este é pesado à chegada, e é determinado o peso total dos resíduos. O valor do peso, ou da quantidade total recolhida, também consta nos relatórios, e poderia ser usado para determinar aproximadamente a quantidade de resíduos contida em cada contentor de ecoponto aquando do momento da recolha. No entanto, o nível de

ocupação (volume) ou de compactação dos resíduos em cada contentor pode não traduzir de forma consistente o seu peso total (ou quantidade).

Com base nos dados disponíveis nos relatórios, a Braval elaborou um registo em formato digital de todas as recolhas efetuadas nos seis municípios onde atua durante o ano de 2013 e parte de 2014, onde estão anotadas todas as recolhas efetivas dos contentores dos ecopontos em utilização, em cada mês do referido ano. Devido a ser um trabalho extremamente moroso, esta passagem de informação dos relatórios em papel para formato digital apenas foi realizada de janeiro de 2013 até junho de 2014 (inclusive). Assim, não existem dados disponíveis em formato digital que sejam suficientes para a construção de séries temporais extensas. Idealmente, com um mínimo de três anos de registos poder-se-ia construir uma série temporal suficientemente extensa para se realizar uma análise mais completa da evolução da geração de resíduos ou do número de recolhas em cada mês do ano. Ao autor da presente investigação foi disponibilizado o referido registo de recolhas da Braval em formato digital, mais concretamente sob a forma de folhas de cálculo da aplicação de *software* Microsoft® Excel. Também foi disponibilizada uma lista com características dos ecopontos:

- Código de identificação;
- Localização (freguesia, local, coordenadas GPS);
- Tipo de ecoponto: superfície ou subterrâneo;
- Constituição/configuração do ecoponto: nº e tipo de fileiras (contentores);
- Capacidade em litros de cada contentor do ecoponto;
- Outras informações: estado do ecoponto, data de colocação, data de remoção, data de deslocalização, alterações (definitivas ou temporárias) efetuadas à capacidade ou tipo ou configuração, ocorrências (se ardeu), se está ativo apenas durante o verão, se está no interior de algum recinto fechado para utilização exclusiva (por exemplo num restaurante, café, supermercado, escola, edifício governamental, etc...), entre outras.

Foram disponibilizados seis ficheiros com extensão “.kml”, cada um contendo uma lista de ecopontos referenciados geograficamente referentes a um determinado município. Esses ficheiros podem ser lidos pelo *software Google Earth*, que é um sistema de informação geográfica (SIG), e assim os ecopontos podem ser visualizados num mapa constituído por imagens obtidas via satélite, oferecendo uma perspectiva espacial dos ecopontos e do seu contexto geográfico, sendo possível assim analisar o espaço circundante com mais detalhe. Em

conjunto com a ferramenta *Google Maps* (outro SIG), é possível combinar informações úteis como a localização de:

- Escolas e outras instituições de ensino;
- Edifícios governamentais;
- Alguns cafés, restaurantes e bares/discotecas;
- Alguns supermercados, talhos, farmácias e outros negócios de comércio a retalho;
- Centros de lazer e de divertimento (parques, praias, monumentos e edifícios religiosos de grandes dimensões,...);
- Centros de atividades desportivas (campos de futebol, piscinas, complexos desportivos).

Informações mais completas relativamente à atividade comercial a retalho, de restauração, hoteleira, atividade de café/bar/cevejaria/salão de chá, padarias e pastelarias, podem ser obtidas utilizando diretórios de empresas na internet, como por exemplo o *website* Portugalio ou o iGoGo. Conjugando essas informações com as obtidas via *Google Earth* e *Google Maps*, é possível obter uma caracterização do espaço envolvente em que está inserido cada ecoponto e assim definir fatores que possam ter influência direta na geração de resíduos.

4.1.3 Processamento dos dados

O desenvolvimento efetivo de modelos de previsão foi antecedido por um processamento dos dados obtidos usando as várias fontes de informação referidas anteriormente. Foram usadas listas contendo dados específicos de todos os ecopontos instalados nos concelhos de Amares e Vila Verde, tendo-se obtido um registo com os dados de mais de 250 ecopontos. De entre esses dados constavam as coordenadas GPS de cada ecoponto, as capacidades dos contentores e o número de contentores para cada tipo de resíduos (papelões, embalões e vidrões), a freguesia a que pertence, data de colocação, etc. Estas informações foram posteriormente combinadas com as estatísticas relativas às recolhas dos diferentes tipos de resíduos, as quais indicavam o número de vezes por mês que cada contentor de ecoponto (papelão, embalão e vidro) foi visitado e esvaziado durante o ano de 2013. Cada tipo de contentor pode ter um ritmo de enchimento diferente, ou seja, um embalão tende a encher mais depressa do que um vidro, pois os resíduos nele depositados (embalagens de plástico e metal) apresentam maior volume

do que os recipientes de vidro, que ao serem depositados no vidro partem com facilidade e ocupam menos espaço no contentor.

Quanto aos indicadores demográficos, os seus valores foram obtidos através da consulta de informações disponíveis dos últimos censos efetuados em Portugal e se referem ao ano de 2011. Foram determinados fatores para cada freguesia analisada, tais como a densidade populacional em cada freguesia, número de ecopontos/contentores existentes por quilómetro quadrado, e ainda o número de ecopontos/contentores disponíveis ao público em geral (habitantes/ecoponto). Utilizando o *software Google Earth* foi possível extrair informação de cariz demográfico referente a cada ecoponto de uma forma mais individual, analisando a área circundante de cada ecoponto num raio de 300 metros. Deste modo foi possível efetuar uma contagem do número de habitações (ou edifícios habitacionais) nesse espaço, deste modo determinando o que se pode denominar de “mancha habitacional” ou “mancha residencial” de um ecoponto, que caracteriza mais especificamente um ecoponto a nível demográfico. Após quantificada segundo uma escala específica, a mancha habitacional passa a designar-se por **fator demográfico (FD)**. Esta medida específica de 300 metros pode ser vista como a sua área de ação mais efetiva, pois segundo a Braval, os cidadãos tendem a não percorrer distâncias superiores a essa para depositar os seus resíduos para reciclagem num ecoponto.

A recolha de dados de natureza socioeconómica envolveu o recurso a ferramentas de *software* de SIG, tais como o *Google Earth* e o *Google Maps*. Informação complementar foi obtida utilizando os *websites* da internet Portugalio e iGoGo. Durante a recolha desses dados teve-se em consideração a **área de influência de ecoponto** (300 metros em torno de cada ecoponto), e efetuou-se uma contagem do número de escolas e outras instituições de ensino, edifícios governamentais, estabelecimentos de comércio a retalho, cafés, bares, restaurantes, hotéis e pousadas, infraestruturas de desporto e também de lazer. Entendeu-se que os valores das contagens feitas poderiam convergir para um valor único designado por **fator socioeconómico**, ou simplesmente **FSE**, composto por seis subfactores os quais constam na Tabela 1. Exemplos de como se determinaram os valores dos subfactores socioeconómicos utilizando os SIG estão disponíveis nas Figuras 4 e 5. O valor do FSE para cada ecoponto poderá ser calculado de diferentes formas, e só através de experimentação será possível identificar a fórmula de cálculo mais apropriada, bem como a escala de valores a adoptar.

Tabela 1 – Subfactores utilizados para caracterizar o Fator Socioeconómico (FSE).

Subfactor	Designação	Descrição
1	<i>Esc</i>	Nº de Escolas e outras instituições de ensino
2	<i>EdGov</i>	Nº de Edifícios Governamentais
3	<i>CBRPP</i>	Nº de Cafés, Bares/Discotecas, Restaurantes, Padarias e Pastelarias
4	<i>CRet</i>	Nº de estabelecimentos de Comércio a Retalho
5	<i>HPA</i>	Nº de Hotéis, pousadas, e outras infraestruturas de alojamento
6	<i>LTD</i>	Nº de infraestruturas de Lazer, atrações turísticas e Desporto

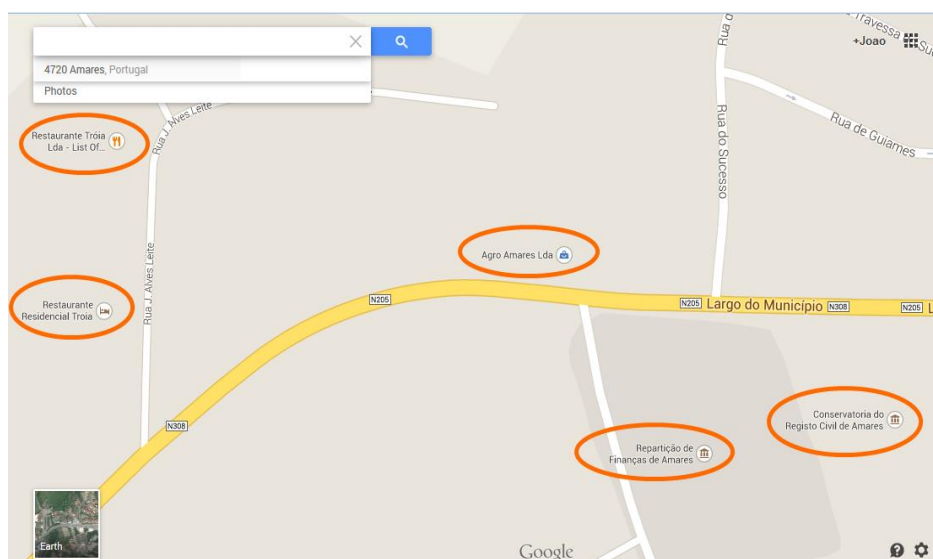


Figura 4 – Identificação de elementos relacionados com os subfactores que caracterizam a área de influência de um ecoponto em termos socioeconómicos usando o SIG *Google Maps*.



Figura 5 – Identificação de elementos relacionados com os subfactores que caracterizam a área de efeito de ecoponto em termos socioeconómicos usando o SIG *Google Earth*.

Durante a análise socioeconómica foi mantida uma contagem de quantos ecopontos se encontram colocados dentro dos limites da área de influência de um ecoponto, o que de certa forma traduz um tipo de fator de competição entre ecopontos. Assumiu-se que a existência de um ou mais ecopontos na área de influência de um outro ecoponto elevaria a “concorrência”, ou seja, a afluência teórica ao ecoponto em questão pode ser menor quando existem mais opções para depositar RED na mesma área de influência. Estabeleceu-se um fator de concorrência de para cada tipo de contentor de ecoponto (papelão, embalagem e vidro).

Os fatores que foram considerados como detentores de relevância para o desenvolvimento do modelo de previsão estão listados na Tabela 2, assim como as suas respetivas descrições.

Tabela 2 – Fatores potencialmente relevantes para geração de resíduos para reciclagem.

Fator	Acrónimo	Descrição
1	<i>DP</i>	Densidade Populacional da freguesia
2	<i>NC_x</i>	Nº de Contentores do tipo <i>x</i> na freguesia
3	<i>HC_x</i>	Nº de Habitantes por Contentores existentes na freguesia
4	<i>CC</i>	Concentração de Contentores (nº de contentores por <i>km</i> ²)
5	<i>Tipo</i>	Tipo de Contentor (subterrâneo ou de superfície)
6	<i>Cap</i>	Capacidade do Contentor (em Litros ou <i>m</i> ³)
7	<i>C_x300</i>	Outros Contentores do tipo <i>x</i> num raio de 300m
8	<i>FD</i>	Fator Demográfico
9	<i>FSE</i>	Fator Socioeconómico

De modo a medir o valor do FD para cada ecoponto, a sua área de influência foi classificada num escala a variar entre 1 e 3 (baixo, médio e elevado) em termos de concentração de habitações. A contagem efetuada resulta de uma análise que depende puramente da percepção visual humana em observação direta no mapa digital, e por esse motivo está susceptível ao arbitrio do observador. Contudo, uma regra foi mantida para determinação do valor de FD, a qual é apresentada na Tabela 3. Na Figura 6 consta uma representação da área circundante de um ecoponto (marcador verde ao centro) num raio de 300 metros, e a mancha habitacional encontra-se marcada com a cor laranja.

Tabela 3 – Escala de valores para o Fator Demográfico.

Valor/nível	Descrição
	Mancha Habitacional - Área ocupada por habitações
1	Até $\frac{1}{3}$ da área de efeito
2	Acima de $\frac{1}{3}$ e até $\frac{2}{3}$ da área de efeito
3	Acima de $\frac{2}{3}$ da área de efeito



Figura 6 – Análise da mancha habitacional para determinação do Fator Demográfico (FD). (imagem obtida via Google Earth)

O fator demográfico (FD) não está estreitamente correlacionado com a densidade populacional ou outro fator de cariz demográfico referido anteriormente, uma vez que apenas a área povoada em torno de cada ecoponto é considerada. Além disso, a análise do FD foi feita com recurso ao *software Google Earth* e foi utilizada uma perspetiva *top-down*, ou seja, o mapa foi observado num modo de visualização diretamente de cima para baixo, numa perspetiva praticamente a duas dimensões (2D), e por essa razão uma habitação pode corresponder tanto a uma moradia como a um prédio com vários apartamentos. Deste modo, o valor de FD está sujeito a algumas inconsistências, pois duas áreas podem ter uma mancha habitacional semelhante mas um número diferente de habitantes. Contudo o valor de FD será um fator interessante a explorar quanto à sua aplicação num modelo de previsão.

Para o processo de construção de modelos de previsão nem todos os ecopontos existentes nos concelhos de Amares e Vila Verde são utilizados. Dos mais de 250 ecopontos que foram analisados, apenas 204 foram elegíveis. Da lista inicial foram removidos ecopontos com menos de 6 recolhas anuais pois a inclusão desses ecopontos com um número de ocorrências de recolhas tão baixo poderiam influenciar negativamente o processo de determinação do modelo de previsão, introduzindo uma espécie de “ruído”. Também não se consideraram ecopontos que foram colocados ou removidos durante o ano de 2013, ou seja, todos aqueles para os quais não haviam dados completos durante 12 meses em termos de recolhas efetuadas. Existem ecopontos que foram deslocalizados mas o seu código de identificação não se alterou, e portanto também esses não foram eleitos. Casos em que os contentores dos ecopontos arderam e não foram recolocados durante mais de 2 meses não foram considerados para o modelo, assim

como ecopontos cuja constituição mudou, ou seja, foram removidos contentores ou acrescentados contentores extra. Outros casos de remoção foram ecopontos apenas colocados ou ativos durante os meses de verão (junho, julho e agosto), e também ecopontos interiores, os quais se encontram em recintos fechados para uso exclusivo de algum estabelecimento como restaurantes, quintas de eventos, cafés, bares, supermercados, recintos de escolas ou edifícios governamentais.

A partir da lista final com 204 de ecopontos elegíveis e dos valores de recolhas anuais para cada um dos seus contentores, obteve-se a distribuição da frequência da variável dependente, recolhas por ano ou RPA, para cada um dos tipos de contentor considerados: papelões, embalões e vidrões. As três distribuições de RPA constam nos gráficos das Figuras 7, 8 e 9. Para resíduos do tipo papel o valor de RPA varia entre 6 e 142 (Figura 7). Para as embalagens o valor está entre 6 e 129 (Figura 8). Por fim, os valores de RPA para vidro variam entre 1 e 60 (Figura 9). Os contentores de cada tipo de resíduo estão dispostos nos gráficos de distribuição ao longo de dez categorias/intervalos de valores de RPA.

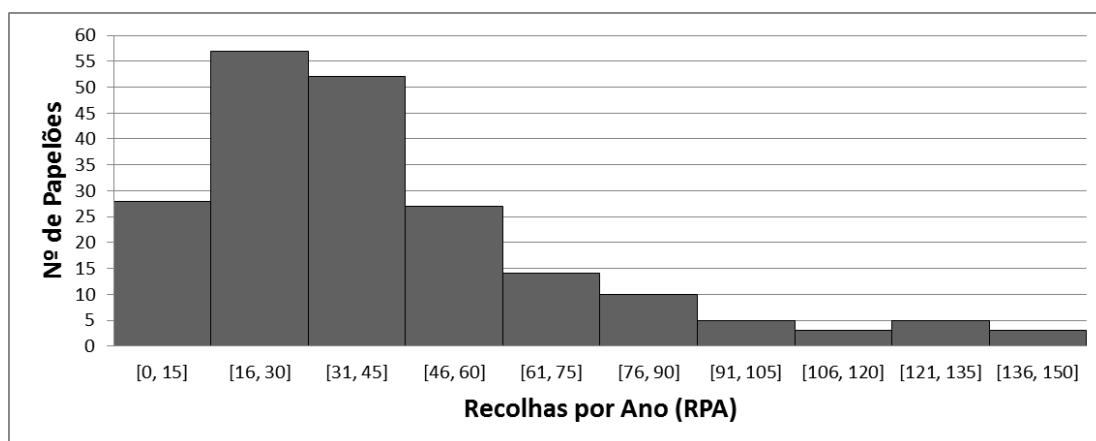


Figura 7 – Distribuição da variável RPA para os papelões.

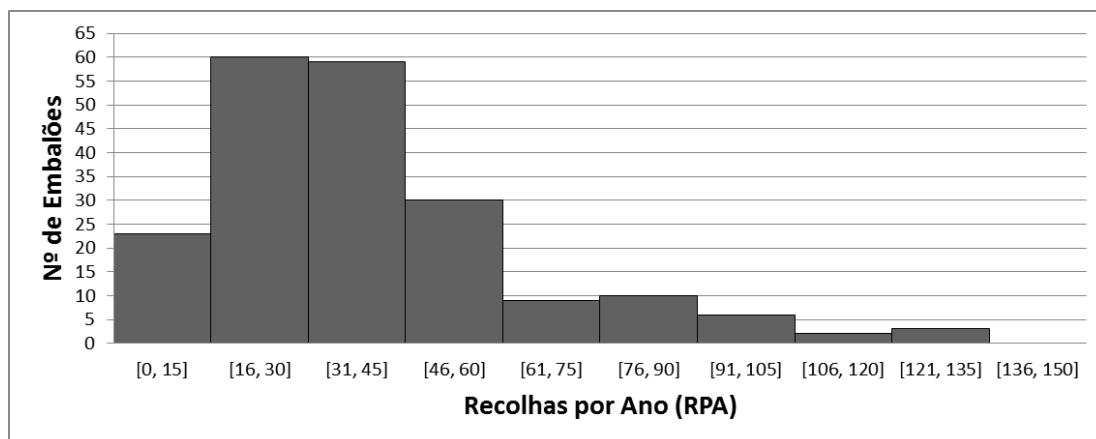


Figura 8 – Distribuição da variável RPA para os embalões.

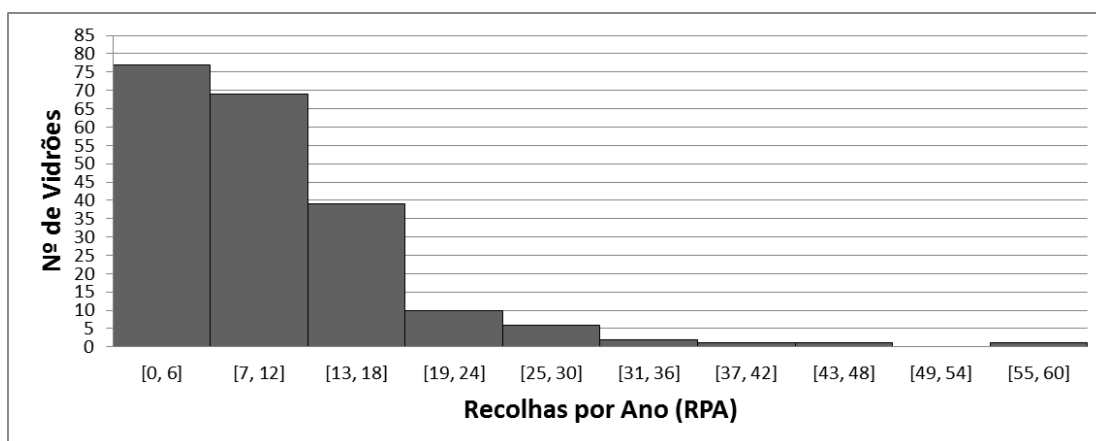


Figura 9 – Distribuição da variável RPA para os vidrões.

4.2 Metodologias adotadas

Nesta secção irão ser apresentadas as metodologias adoptadas para o desenvolvimento de modelos de previsão, os quais serão posteriormente testados com dados e situações reais. Uma vez que os dados disponíveis das recolhas de RED efetuadas pela Braval constituem uma série temporal muito curta (18 meses), a aplicação de métodos focados em análise de séries temporais para modelar a evolução da variável dependente, por exemplo RPA, não se apresenta como uma solução viável. Assim, propõe-se a utilização de métodos de regressão linear (RL) e de redes neuronais artificiais (RNA) para desenvolver modelos de previsão da geração de RED em papelões, embalões e vidrões. Nas seguintes subsecções serão apresentados em maior pormenor os métodos adoptados para o desenvolvimento de modelos de previsão.

4.2.1 Modelos de regressão linear múltipla

Os modelos de regressão linear são vastamente utilizados em contextos onde previsões da evolução dos valores de certas variáveis são necessárias. A metodologia da regressão linear tem provado ser um método bastante eficiente em estudos realizados em várias áreas da ciência. Em estudos relacionados com a previsão da geração de resíduos, a regressão linear foi aplicada com bastante sucesso em trabalhos como [10], [42], [46] e [50], entre outros.

A regressão linear é uma técnica que permite o estabelecimento de relações entre variáveis, de tal forma que é possível prever a evolução ou o valor de uma variável y (variável dependente), bastando para tal utilizar os valores das restantes variáveis (variáveis independentes), denotadas como $x_1, x_2, \dots, x_k \in X$. Numa regressão linear, a variável dependente y é a combinação linear de um conjunto de parâmetros (ou coeficientes - β_1, β_2 , etc.) e as variáveis independentes. Quando um modelo apenas possui uma variável independente para determinar a variável dependente, estamos perante uma regressão linear simples. No caso de se utilizar mais do que uma variável independente, o modelo que se obtém é uma regressão linear múltipla (RLM). Um exemplo de um modelo genérico de regressão linear múltipla é apresentado na Equação (1), em que o símbolo ε representa o valor do erro da previsão. Os valores dos coeficientes (β_1, β_2 , etc...) são estimados a partir dos valores das variáveis independentes através do método dos mínimos quadrados.

$$y_i = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

Uma vez que neste capítulo foram apontados nove fatores que potencialmente explicam a geração de resíduos para reciclagem, existem nove variáveis independentes para integrar os modelos de previsão (Tabela 2), pelo que se antevê uma série de diferentes combinações possíveis de efetuar entre essas variáveis independentes, e por essa razão a regressão linear múltipla será primordialmente aplicada.

4.2.2 Modelos de redes neuronais artificiais

Uma das metodologias que se pretendem aplicar para desenvolver modelos de previsão são as redes neuronais artificiais (RNA), que constituem uma técnica de aprendizagem automática (*machine learning*) que inclui algoritmos que permitem criar uma espécie de inteligência artificial com capacidades de aprendizagem. A investigação científica em torno das RNA começou a ser

apresentada em 1943, onde os autores McCulloch e Pitts [68] apresentaram o conceito de neurónios artificiais. As RNA têm sido aplicadas em larga escala no âmbito dos modelos de previsão, tendo alcançado elevado sucesso em vários estudos, e o reconhecimento da comunidade científica face às RNA tem sido favorável.

As RNA são redes de neurónios artificiais, e o seu funcionamento é inspirado no modo de funcionamento do cérebro humano. Um esquema de neurónio artificial é disponibilizado na Figura 10. As RNA são normalmente utilizadas para modelar relações não lineares entre dados de entrada (*input*) e dados de saída (*output*). Além disso podem ser aplicadas para identificar padrões de entre vastas quantidades de dados.

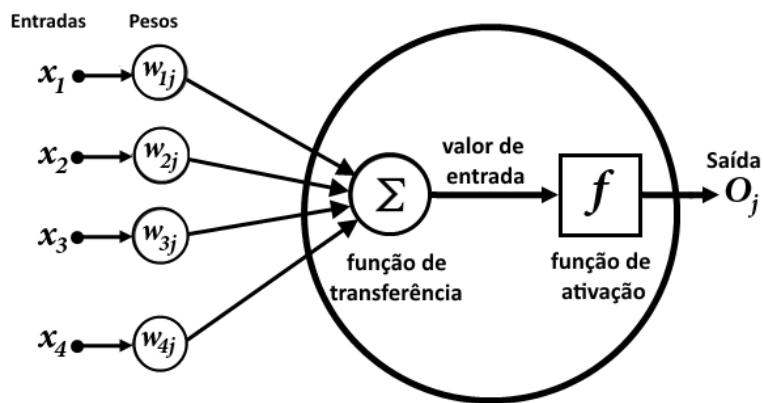


Figura 10 – Esquema de um neurónio artificial.

As RNA são em muitos casos estruturadas em camadas de neurónios, onde pelo menos duas camadas estão presentes: a camada de entrada (*input layer*) e a de saída (*output layer*). Podem existir camadas intermédias, as quais são frequentemente designadas por camadas escondidas (*hidden layers*). Este conceito de estrutura das RNA denomina-se *Multi-Layer Perceptron* (MLP) [85]. No MLP, os neurónios de uma camada estão conectados aos neurónios da camada seguinte, e estas conexões (ligações) são vistas como sinapses artificiais.

Em termos de topologia das RNA, a mais comum é a *feed-forward*, em que a informação flui da camada de entrada em direção à camada de saída, atravessando as diversas sinapses existentes. A cada sinapse está associado um parâmetro designado por “peso” (*weight*). Estes pesos das sinapses possuem valores adaptáveis, os quais são modificados ao longo do processo de aprendizagem da rede neuronal. Um esquema representativo de uma rede neuronal do tipo MLP com topologia *feed-forward* é apresentado na Figura 11.

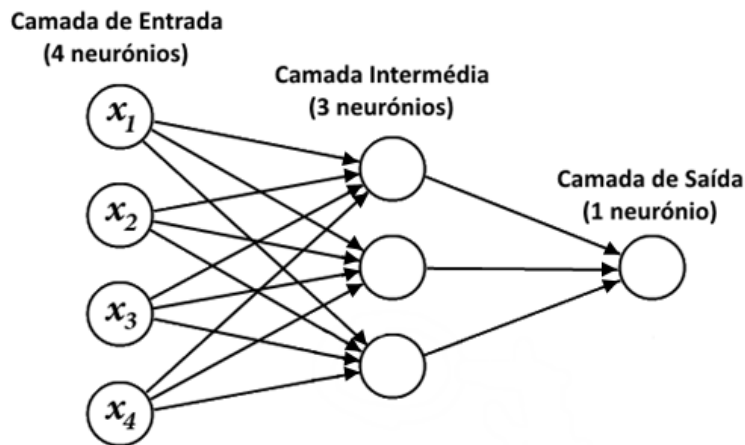


Figura 11 – Esquema de um exemplo de rede neuronal MLP *feed-forward*.

A aplicação de redes neuronais inclui duas fases: a fase de treino e a fase de generalização/classificação. A fase de treino ocorre primeiro, e esta é iniciada após terem sido disponibilizados dados para treino na camada de entrada. Durante esta fase, os neurónios passam por um período de aprendizagem, e no fim a rede neuronal é capaz de produzir dados de saída que sejam estreitamente relacionados com os dados de entrada. A fase de generalização assenta na aplicação efetiva da rede neuronal, em que dados diferentes dos utilizados na fase de treino são introduzidos na camada de entrada, sendo estes dados posteriormente processados ao longo das camadas de neurónios, sendo obtidos dados de saída de acordo com a lógica determinada durante a fase de treino.

Em termos de aplicação de RNA para desenvolvimento de modelos de previsão da geração de resíduos, optou-se por seguir as características sugeridas em estudos efetuados neste contexto como [1], [5], [71], [91] e [113]. O nível de complexidade dos problemas apresentados nesses estudos é semelhante ao problema tratado nesta tese, e por isso optou-se por seguir a estrutura de RNA do tipo MLP com três camadas: entrada, saída e uma intermédia, dado que esta é a estrutura mais utilizada pelos trabalhos referidos. Quanto à topologia da rede, a rede será feed-forward. Relativamente ao método de treino, foi escolhido o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* (L-M) [61][66], por ser um método simples mas muito robusto e eficiente. O algoritmo de L-M é um método híbrido baseado no método de *Gauss-Newton* e no método do gradiente descendente. Uma vantagem em utilizar este método é que não possui tantos parâmetros para ajustar como outros métodos de treino de RNA bastante usados, como é o caso do método *Back-Propagation* [86].

Existe um conjunto de parâmetros que são necessários definir para se obter um funcionamento apropriado das RNA; parâmetros como o número de neurónios em cada camada,

parâmetros de treino, e também o tipo de função de ativação que converte dados de entrada num neurónio na respetiva saída. Alguns parâmetros são específicos de um dado método de treino, por isso o número de parâmetros associados a uma RNA pode variar. Os valores dos parâmetros são ajustados através da execução de vários tipos de treino e configurações, e a obtenção de uma configuração óptima da rede está dependente da realização de um elevado número de experiências, as quais são executadas consecutivamente, ao mesmo tempo que se analisa o e compara o desempenho da rede após cada experiência. Este processo pode consumir muito tempo se for feito “manualmente”, e por isso existem algoritmos que automatizam o processo e permitem obter uma configuração de parâmetros otimizada para se obter a melhor prestação da rede neuronal. Por exemplo, os algoritmos genéticos são aplicados com frequência para este propósito.

4.3 Experiências para a previsão da geração de resíduos

A fase experimental engloba o desenvolvimento e teste de diversos modelos de previsão baseados nas duas metodologias adoptadas: regressão linear (RL) e redes neuronais artificiais (RNA), com o intuito de se obter um modelo final cujo desempenho seja satisfatório de acordo com os objetivos traçados e validado pela empresa Braval. No caso da aplicação do método de RL, serão testadas diferentes combinações dos fatores de relevância para a geração de RED, podendo-se obter modelos de previsão baseados em regressão linear simples ou múltipla. Ao testar modelos de RNA, também diversas combinações de fatores serão exploradas. Pretende-se também testar diferentes estruturas e configurações de RNA, de modo a identificar os modelos de previsão que melhor explicam a geração de cada tipo de resíduo para reciclagem. Por fim, os desempenhos dos dois métodos escolhidos, RNA e RL, serão avaliados e comparados no contexto do problema de previsão sob estudo.

Nesta secção da tese serão expostas suposições feitas e serão propostas e exploradas diversas hipóteses de modelação. Comparações de resultados das experiências realizadas também serão apresentadas. O propósito final das experiências é a identificação do modelo de previsão mais adequado para cada tipo de contentor, tendo como base de avaliação o desempenho em termos de erros de previsão, assim como a estabilidade e robustez das previsões efetuadas. Outro objetivo passa por identificar quais os fatores que realmente são relevantes para determinação do ritmo de enchimento dos contentores dos ecopontos, partindo

da lista de fatores que se consideraram inicialmente, e que constam na Tabela 2. Cada modelo resulta de uma combinação única de fatores e valores de parâmetros.

A exatidão é uma característica muito importante num modelo de previsão. Um bom modelo de previsão possui uma exatidão elevada. A exatidão está relacionada com os erros que surgem nas previsões que se efetuam com um modelo. Quanto mais baixo for o valor dos erros, mais exato é o modelo. De acordo com a Equação (2), o erro de previsão (E_t) do período t é a diferença entre o valor real observado da variável que se quer estimar (Y_t) e o valor previsto do período correspondente P_t . Existem várias medidas de exatidão que permitem avaliar o desempenho de um modelo de previsão em termos de exatidão. Algumas das medidas mais usadas constam na Tabela 4.

$$E_t = Y_t - P_t \quad (2)$$

Tabela 4 – Medidas de exatidão para modelos de previsão.

Medida de Exatidão	Fórmula
Desvio Absoluto Médio (DAM)	$DAM = \frac{\sum_{t=1}^N E_t }{N}$
Erro Absoluto Percentual Médio (EAPM)	$EAPM = \frac{\sum_{t=1}^N \left \frac{E_t}{Y_t} \right }{N}$
Erro Quadrático Médio (EQM)	$EQM = \frac{\sum_{t=1}^N E_t^2}{N}$
Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM)	$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N E_t^2}{N}}$

Estas medidas de exatidão poderão ser utilizadas para avaliar o desempenho dos modelos que foram desenvolvidos. Outro modo de avaliar um modelo de previsão em termos de exatidão é através do coeficiente de determinação, também referido como R^2 . O R^2 indica quão bem o modelo de previsão se adequa ao tipo de dados utilizados. Pode ser interpretado como a proporção da variabilidade na variável dependente que é previsível com base nas variáveis independentes. No geral, quanto mais elevado for o valor de R^2 , mais exato é o modelo. O R^2 apresenta sempre um valor entre 0 e 1, em que o valor 1 indica que o modelo se adequa completamente aos dados e permite efetuar previsões exatas. O valor zero indica que o modelo falha completamente na modelação dos dados.

4.3.1 Testes com modelos de regressão linear múltipla

As experiências realizadas com modelos de regressão linear assentaram principalmente no desenvolvimento de modelos de regressão linear múltipla (RLM), e foram realizadas com recurso ao *software ForecastPro* 3.0. Foram utilizados os dados previamente processados na secção 4.1.3, e obteve-se uma lista com 204 ecopontos de Amares e Vila Verde e os respetivos valores para os nove fatores que foram definidos na secção 4.1.3. No trabalho apresentado em [38], foram realizados testes apenas com esses nove fatores, e apenas para modelar a geração dos resíduos do tipo papel ou cartão. Nesta tese pretende-se alargar o número de fatores testados, alterar as escalas de valores desses fatores, e explorar mais combinações de fatores, com o objetivo de determinar modelos de previsão mais robustos e exatos. Um total de 39 fatores foram desenvolvidos e considerados para teste. A descrição completa desses fatores encontra-se na secção de anexos deste documento (ver Anexos V).

O desenvolvimento dos modelos de previsão assentou nos dados dos 204 ecopontos elegíveis. Contudo, os dados de 50 desses ecopontos foram utilizados para testar o desempenho dos modelos e prever valores de recolhas por ano (RPA) para cada ecoponto. Portanto, efetivamente apenas foram usados 154 para criação de modelos de previsão de RPA para papelões (RPA_P), embalões (RPA_E), e vidrões (RPA_V).

Numa fase inicial dos testes, cada um dos 39 fatores foi avaliado individualmente, tendo sido gerado um modelo de regressão linear simples para cada fator. As medidas de exatidão escolhidas para avaliação do desempenho dos modelos foram o DAM e o R^2 . Os fatores cujos modelos obtiveram os valores de R^2 mais elevados e o DAM mais baixo foram considerados como fatores-base para construção de novos modelos.

Uma outra via seguida para identificar os fatores com maior potencial para prever RPA consistiu em criar modelos com dez fatores, e gradualmente foram-se removendo os que apresentavam menor nível de significância para o desempenho do modelo, até se obterem modelos em que todos os fatores eram significativos.

Após a identificação dos fatores-base, foram testadas 162 combinações usando os 39 fatores de teste, tendo-se obtido 162 modelos de regressão linear múltipla para previsão de RPA para cada tipo de contentor, o que se traduziu num total de 486 modelos. De entre todos esses modelos, identificaram-se os três com melhor desempenho na previsão de RPA_P , RPA_E e RPA_V . Na Tabela 5 apresentam-se esses três melhores modelos e os respetivos valores de R^2 e DAM para dados fora da amostra, ou seja, para 50 ecopontos do conjunto de teste.

Tabela 5 – Melhores modelos de RLM para previsão de RPA.

MODELO	VARIÁVEL DEPENDENTE	FATORES	DAM	R ²
1	RPA_P	FD, C_P300 , Tipo, Cap, EdGov, Esc, CRET2, CBRPP, CC_P , HC_P	13.98	0.5019
2	RPA_E	FD, Cap, C_E300 , $HC2_E$, Tipo, FS3	26.66	0.2423
3	RPA_V	FD, C_V300 , Tipo, NC_V , H, Esc, CRet2, Cap	3.79	0.4294

A medida com mais impacto na escolha de cada um dos três modelos finais foi o valor de R^2 . O valor de DAM foi muito importante na escolha, mas não determinante, pois obtiveram-se modelos com valores de DAM mais baixos, mas que não acompanham tão bem as variações da variável dependente (RPA). Com base no valor de R^2 , de certa forma pode afirmar-se que:

- O modelo 1 consegue explicar 50.19% do valor da variável independente RPA_P ;
- O modelo 2 consegue explicar 24.23% do valor da variável independente RPA_E ;
- O modelo 3 consegue explicar 42.94% do valor da variável independente RPA_V .

De modo a se obter uma percepção visual do nível de adequação de cada modelo, apresentam-se da Figura 12 à Figura 14 gráficos com os valores reais observados e os valores previstos pelos modelos para cada tipo de resíduos/contentores. Na Figura 12 é observável uma previsão que acompanha de forma próxima as variações da variável RPA.

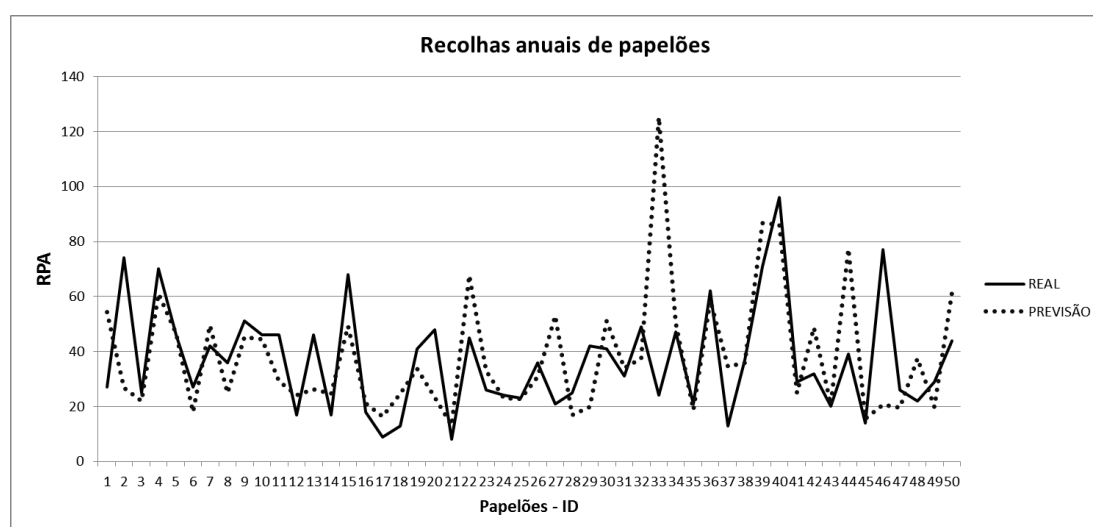


Figura 12 – Valores reais e valores previstos de RPA_P para os dados de teste.

No caso do modelo para previsão de RPA_E , observa-se na Figura 13 que as previsões são menos precisas e não dão boa resposta às variações da variável dependente. O valor de R^2 traduz bem esta situação. Para valores mais elevados obtiveram-se previsões mais baixas que o desejado.

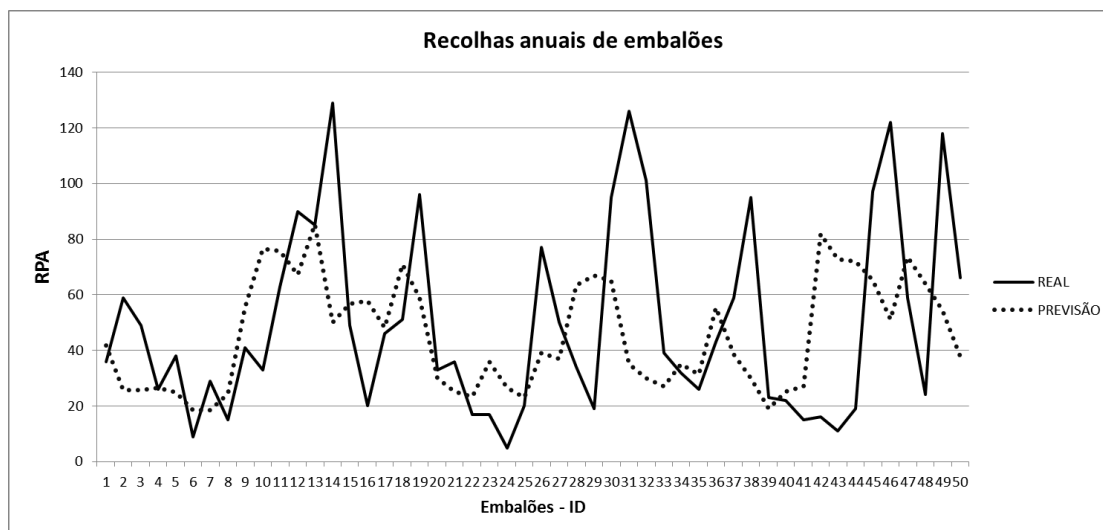


Figura 13 – Valores reais e valores previstos de RPA_E para os dados de teste.

Para o modelo de previsão de RPA para os vidrões (Figura 14), é possível observar previsões com nível elevado de exatidão, e acompanham facilmente as variações de RPA_V . De destacar apenas a impossibilidade do modelo dar resposta adequada a alguns valores mais elevados de RPA.

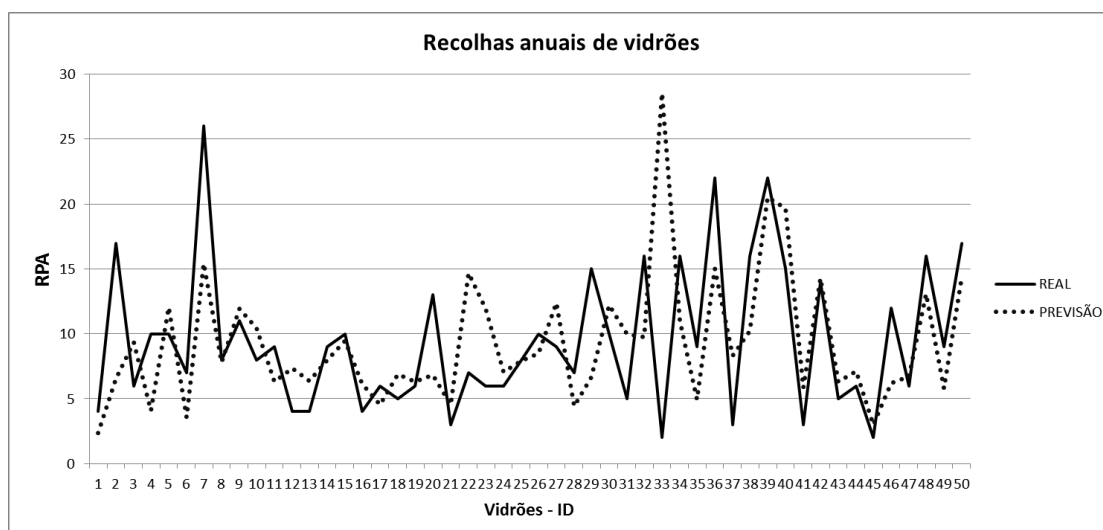


Figura 14 – Valores reais e valores previstos de RPA_V para os dados de teste.

Todos os fatores que figuram nesses modelos foram considerados como fatores importantes para a previsão de RPA, e encontram-se listados na Tabela 6. As estimativas dos parâmetros

para cada um dos modelos encontram-se nas Tabelas 7, 8 e 9. Por fim, nas Equações (3),(4) e (5) apresentam-se as fórmulas matemáticas dos modelos de previsão de RPA_P , RPA_E e RPA_V .

Tabela 6 – Fatores mais importantes para a previsão de RPA com modelos de RLM.

FATORES		
RPA_P	RPA_E	RPA_V
FD	FD	FD
C_P300	NC_E	C_V300
Tipo	C_E300	Tipo
Cap	$HC2_E$	NC_V
EdGov	Tipo	H
Esc	FS3	Esc
CRet2		CRet2
CBRPP		Cap
CC_P		
HC_P		

Tabela 7 – Estimativas dos parâmetros para o melhor modelo de previsão de RPA_P .

Fator	Coefficientes	Erro Standard	t-Statistic	Significância
FD	23.09999	2.314379	9.981073	1
C_P300	-6.69308	2.452423	-2.72917	0.993651
Tipo	22.03505	3.920612	5.620309	1
Cap	-4.41991	1.437962	-3.07373	0.997886
EdGov	3.52828	2.454863	1.437261	0.849357
Esc	7.22613	2.499045	2.891557	0.996167
CRet2	1.483991	0.868584	1.708518	0.91246
CBRPP	1.013904	0.62996	1.609474	0.892487
CC_P	3.614182	1.217618	2.96824	0.997005
HC_P	0.013718	0.010226	1.341517	0.820248

Tabela 8 – Estimativa dos parâmetros para o melhor modelo de previsão de RPA_E .

Fator	Coefficientes	Erro Standard	t-Statistic	Significância
FD	9.52516	2.167209	4.395128	0.999989
NC_E	2.186509	0.562207	3.88915	0.999899
C_E300	-4.42889	2.088193	-2.12092	0.966071
$HC2_E$	3.665681	0.774964	4.73013	0.999998
Tipo	9.22163	3.740583	2.465292	0.98631
FS3	1.761194	1.311112	1.343283	0.82082

Tabela 9 – Estimativa dos parâmetros para o melhor modelo de previsão de RPA_V .

Fator	Coefficientes	Erro Standard	t-Statistic	Significância
FD	4.748042	0.818381	5.801747	1
C_V300	-1.54654	0.764611	-2.02265	0.95689
Tipo	5.542492	1.178143	4.704429	0.999997
NC_V	-0.86585	0.36342	-2.3825	0.982804
H	0.001854	0.000939	1.974213	0.951642
Esc	2.311926	0.826006	2.798922	0.994873
CRet2	0.650836	0.259656	2.506535	0.987808
Cap	0.919708	0.459117	2.00321	0.954845

$$\begin{aligned}
 RPA_P = & 23.1 \cdot FD + 22.04 \cdot Tipo - 6.69 \cdot C_p300 - 4.42 \cdot Cap \\
 & + 3.53 \cdot EdGov + 7.23 \cdot Esc + 1.48 \cdot CRet2 + 1.014 \\
 & \cdot CBRPP + 3.614 \cdot CC_p + 0.0137 \cdot HC_p
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 RPA_E = & 9.53 \cdot FD + 2.19 \cdot NC_E - 4.43 \cdot C_E300 + 3.67 \cdot HC2_E \\
 & + 9.22 \cdot Tipo + 1.76 \cdot FS3
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 RPA_V = & 4.75 \cdot FD - 1.55 \cdot C_v300 + 5.54 \cdot Tipo - 0.865 \cdot NC_V \\
 & + 0.001854 \cdot H + 2.31 \cdot Esc + 0.65 \cdot CRet2 + 0.92 \\
 & \cdot Cap
 \end{aligned} \quad (5)$$

Os modelos finais de RLM que foram desenvolvidos permitiram identificar para cada tipo de resíduos os fatores que realmente influenciam a geração de resíduos. Os fatores não são os mesmos para os três modelos finais (papelões - RPA_P , embalões - RPA_E , e vidrões - RPA_V), mas três deles são comuns: o fator demográfico, o tipo de ecoponto (subterrâneo ou superfície), e o número de contentores do mesmo tipo num raio de 300 metros (papelões, embalões ou vidrões), o que leva a crer que estes fatores serão indispensáveis para efetuar previsões para qualquer um dos tipos de contentor de ecoponto quando se aplica o método da regressão linear.

Relativamente à distribuição dos valores de erros inerentes às previsões efetuadas pelos modelos desenvolvidos, constatou-se que os valores dentro e fora da amostra apresentam distribuição do tipo normal. A representação gráfica da distribuição dos erros é apresentada para cada modelo nas Figuras 15, 16 e 17.

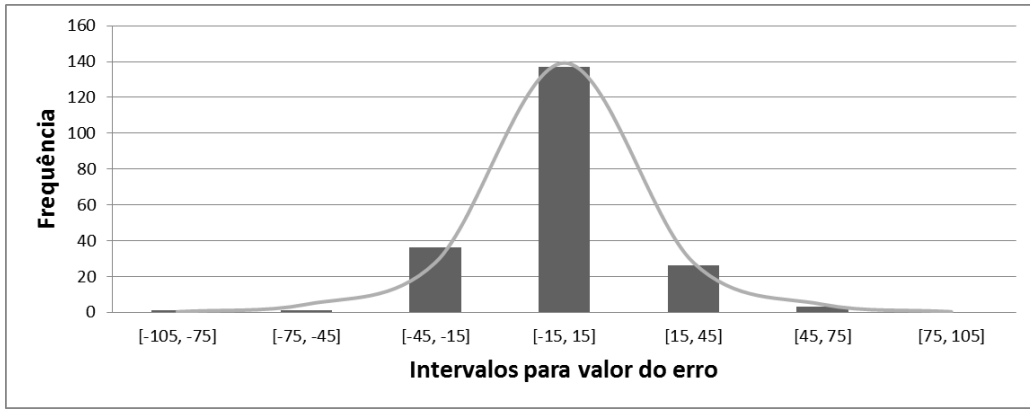


Figura 15 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPA_p .

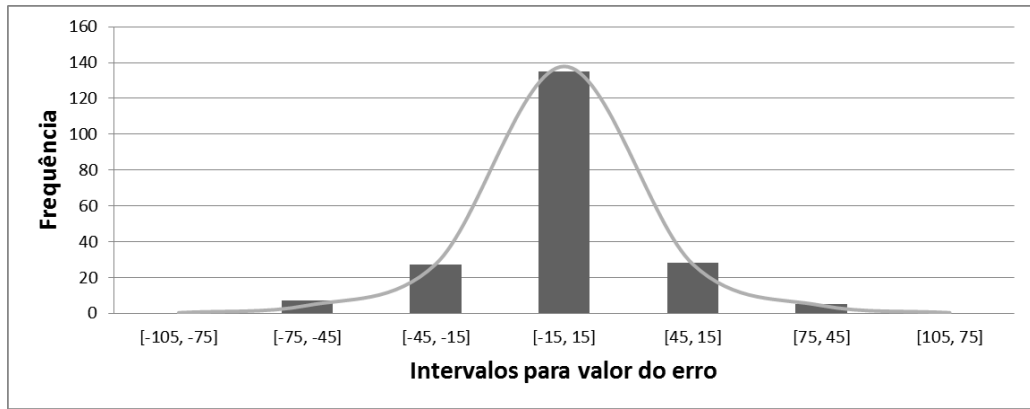


Figura 16 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPA_E .

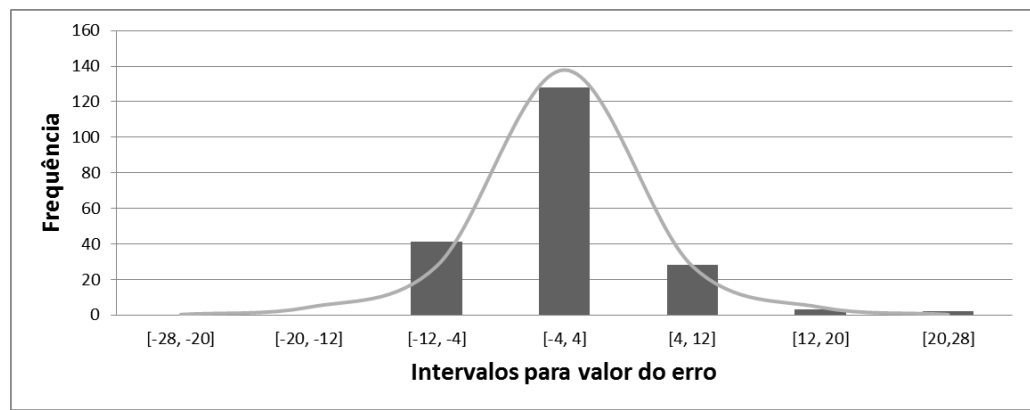


Figura 17 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPA_V .

4.3.2 Testes com modelos de redes neuronais artificiais

O desenvolvimento de modelos de previsão com base na metodologia das redes neuronais artificiais (RNA) foi concretizado com recurso à plataforma de desenvolvimento *Encog* [34], a qual permite construir modelos de RNA com acesso a diversas opções de estruturação, parametrização e de métodos de aprendizagem. Em relação às características base para as RNA dos modelos a desenvolver, foram observadas algumas das escolhas feitas por outros autores que aplicaram esta metodologia para a previsão da geração de resíduos que alcançaram bons desempenhos [1][5][71][91][113]. As características base mais frequentemente escolhidas para as RNA são as seguintes:

- Tipo: MLP;
- Estrutura: 3 camadas (entrada, saída e uma intermédia);
- Topologia: *Feed-forward*.

Em relação ao tipo e à topologia das RNA desenvolvidas para os modelos de previsão, optou-se por seguir a tendência encontrada na literatura. No entanto, para a estrutura das RNA pretendeu-se explorar a utilização de duas camadas intermédias em vez de apenas uma, de modo a verificar se ocorrem melhorias no desempenho das previsões.

Para além da definição das características base das RNA, é necessário especificar o método de treino a efetuar e definir valores para os parâmetros associados. O método de treino que se aplicou foi o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* (L-M). Para este método de treino pretende-se testar o número de épocas (ciclos de treino) com os valores 1000 e 2000.

Ainda a propósito do treino das RNA, para este ser executado deve-se definir as dimensões das amostras de treino. Neste caso mantêm-se os dados dos 204 ecopontos usados nos testes com os modelos de regressão linear na subsecção 4.3.1. Para realização dos treinos e validação dos modelos com base nas RNA, optou-se por dividir os dados em duas partes: amostras para o treino e amostras para teste e validação. Um total de 154 ecopontos-amostra foram designados para treino das RNA, enquanto os 50 ecopontos-amostras restantes foram mantidos para efeitos de teste e validação dos modelos de previsão. Contudo, antes de se aplicar os dados nos modelos, é necessário efetuar uma normalização desses mesmos dados, para que as RNA os possam processar devidamente. Uma série de testes que foram realizados para prever a geração de resíduos em papelões [38], permitiram identificar que a função de ativação dos neurónios mais indicada para os modelos de previsão que se pretendem desenvolver é a função *sigmoid*.

Devido à natureza da função *sigmoid* que produz apenas valores positivos entre 0 e 1, então o intervalo de normalização dos dados deve ser entre 0 e 1. A normalização dos dados é um passo importante no processamento de dados para aplicação nas redes neuronais, pois os valores dos fatores a considerar no modelo de previsão encontram-se em escalas diferentes, e é considerada uma boa prática converter todos esses valores para uma escala comum. Vários estudos apontam que normalizar os dados contribui uma melhoria dos resultados e pode diminuir o tempo necessário para efetuar o treino das redes neuronais.

Estabeleceu-se que o número de neurónios na camada de entrada é sempre igual ao número de variáveis independentes a considerar no modelo de previsão. Na camada de saída, optou-se por se considerar apenas um neurónio para todos os casos, pois pretende-se que o *output* (a saída) seja simplesmente o valor de recolhas por ano (RPA) para um determinado contentor de ecoponto. Quanto ao número de neurónios em cada camada, várias combinações foram testadas de modo a determinar para cada caso uma configuração de RNA que permita um bom desempenho no respetivo modelo de previsão.

Uma vez definidas as características básicas a utilizar nas RNA para os modelos de previsão, avançou-se com a fase de testes. Partindo das 162 combinações de variáveis usando os 39 fatores que se testaram com a metodologia da regressão linear, foram selecionadas apenas as 50 combinações com melhor desempenho na previsão. Optou-se por reduzir o número de combinações de fatores para teste com as RNA, uma vez que estas implicam a afinação de parâmetros que não existem na regressão linear. Assim, para as 50 combinações de fatores, foram testadas várias configurações ao nível do número de neurónios em cada camada intermédia, e o número de camadas intermédias na rede neuronal. Outro parâmetro que se variou foi o número de épocas de treino das redes neuronais.

Construíram-se modelos com até duas camadas intermédias na rede neuronal. Observou-se que apesar da estrutura ficar mais complexa nas redes neuronais com duas camadas intermédias, estas apresentaram melhor desempenho que as redes com apenas uma camada intermédia. O foco dos testes incidiu na exploração de configurações de rede neuronal com os neurónios da primeira camada intermédia a variar entre 2 e 12, e entre 2 e 8 na segunda camada. Valores acima destes tendem a gerar o problema de *overfitting*, em que a rede neural acaba por decorar os dados usados na fase de treino e não consegue dar resposta adequada a novos dados na fase de teste. Em termos do número de épocas de treino das redes neuronais, observou-se que para valores acima de 1000 não é melhorada a qualidade do treino.

Após se ter concluído os testes com as todas as combinações propostas, foi possível identificar os modelos com melhor desempenho na previsão de RPA para papelões (RPA_P), embalões (RPA_E) e vidrões (RPA_V). Na Tabela 5 apresentam-se esses três melhores modelos e os respectivos valores de R^2 e DAM .

Tabela 10 – Melhores modelos de RLM para previsão de RPA.

MODELO	VARIÁVEL DEPENDENTE	RNA CONFIG.	FATORES	DAM	R^2
1	RPA_P	5-4-2-1	FD, NC_P , Tipo, Cap, FSE2	14.9	0.5693
2	RPA_E	5-8-2-1	FD, NC_E , Tipo, Cap, FSE2	26.47	0.5428
3	RPA_V	6-2-2-1	FD, NC_V , Tipo, Cap, FSE2, Esc	4.87	0.3964

Consoante os valores obtidos para R^2 , pode-se afirmar que:

- O modelo 1 consegue explicar 56.93% do valor da variável independente RPA_P .
- O modelo 2 consegue explicar 54.28% do valor da variável independente RPA_E .
- O modelo 3 consegue explicar 39.64% do valor da variável independente RPA_V .

Todos os fatores que figuram nos modelos finais de previsão desenvolvidos foram considerados como fatores importantes para a previsão de RPA quando é aplicada a metodologia das RNA. Esses fatores encontram-se listados na Tabela 11.

Tabela 11 – Fatores mais importantes para a previsão de RPA com modelos de RNA.

FATORES		
RPA_P	RPA_E	RPA_V
FD	FD	FD
NC_P	NC_E	NC_V
Tipo	Tipo	Tipo
Cap	Cap	Cap
FSE2	FSE2	FSE2
		Esc

Da Figura 18 à Figura 20 apresentam-se gráficos com os valores reais observados e os valores previstos pelos modelos para cada tipo de resíduos/contentores para as 50 amostras de teste. No geral, em todos os gráficos é observável o acompanhamento muito próximo das previsões em relação às variações da variável RPA.

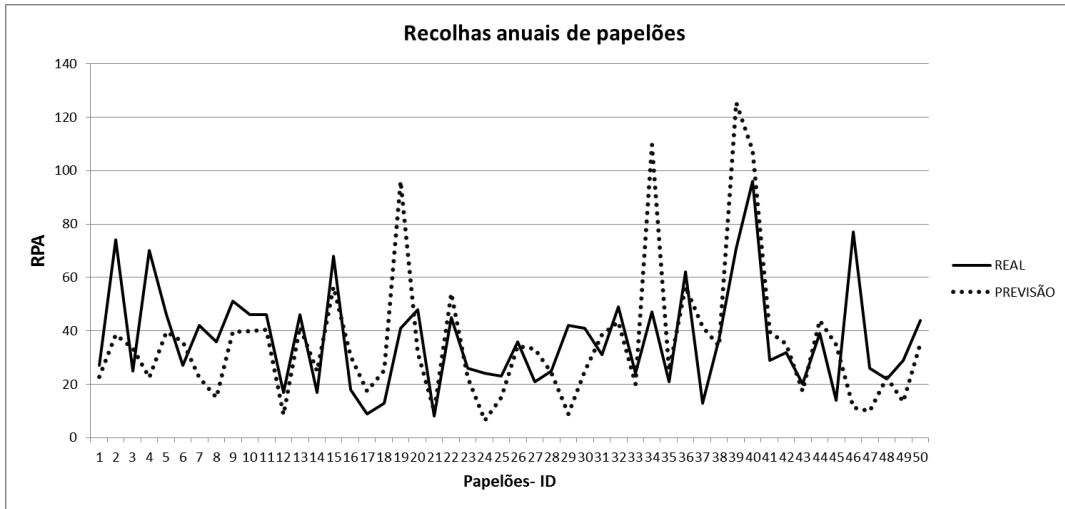


Figura 18 – Valores reais e valores previstos de RPA_p para os dados de teste.

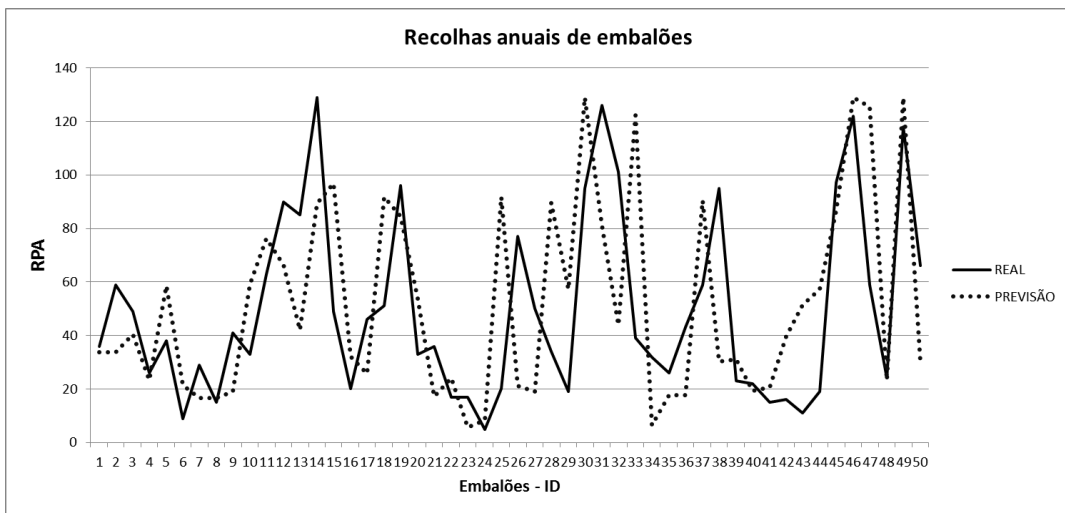


Figura 19 – Valores reais e valores previstos de RPA_E para os dados de teste.

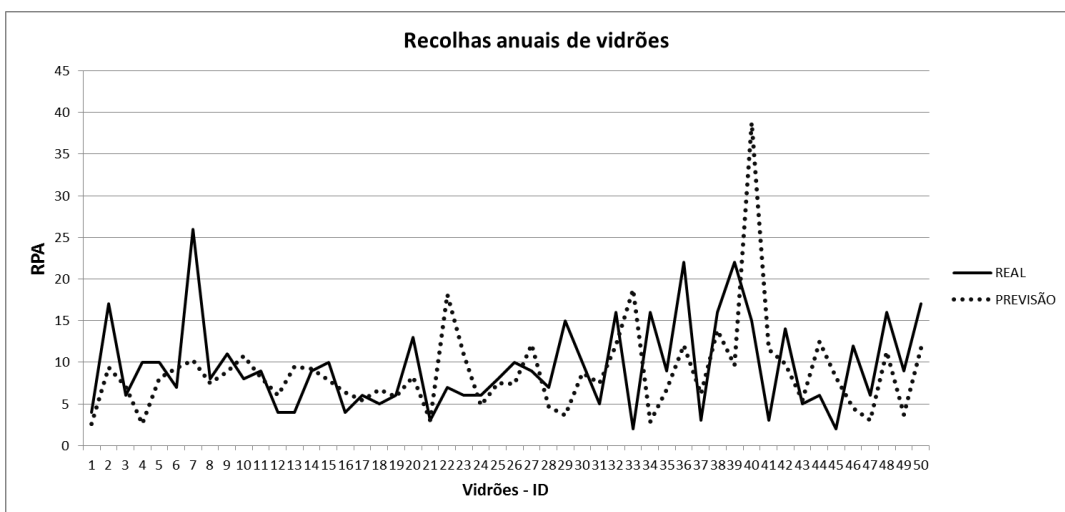


Figura 20 – Valores reais e valores previstos de RPA_V para os dados de teste.

Os testes apresentados nesta subsecção permitiram identificar um conjunto de cinco fatores que são importantes para efetuar previsões do valor de RPA para papelões, embalões e vidrões. Esses fatores são: o fator demográfico, o número de contentores na mesma freguesia, o tipo de ecoponto (subterrâneo ou superfície), a capacidade do contentor e fator socioeconómico. No caso da previsão de RPA para vidrões, também se revelou importante o número de escolas num raio de 300 metros de cada contentor.

Relativamente à distribuição dos valores de erros inerentes às previsões efetuadas pelos modelos desenvolvidos, constatou-se que os valores dentro e fora da amostra apresentam distribuição do tipo normal. A representação gráfica da distribuição dos erros é apresentada para cada modelo nas Figuras 21, 22 e 23.

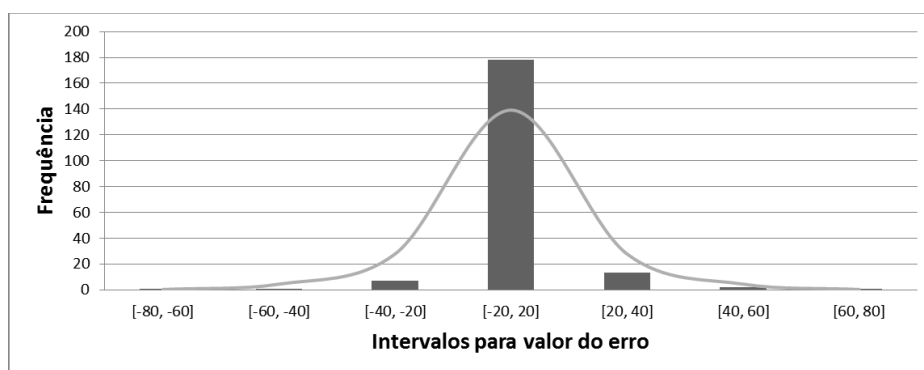


Figura 21 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPA_p .

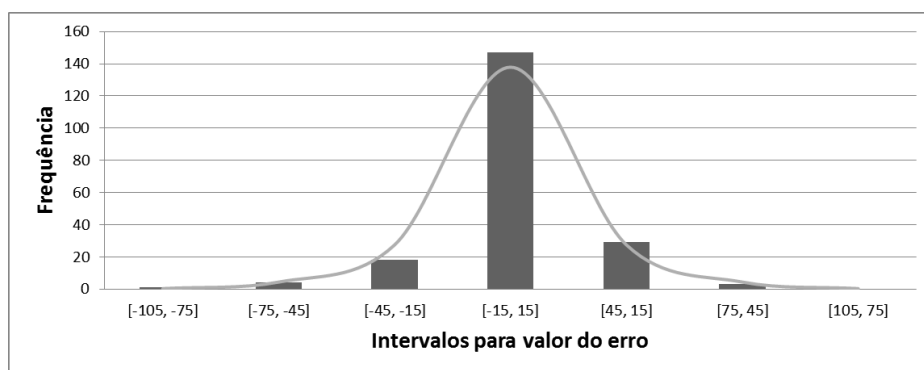


Figura 22 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPA_E .

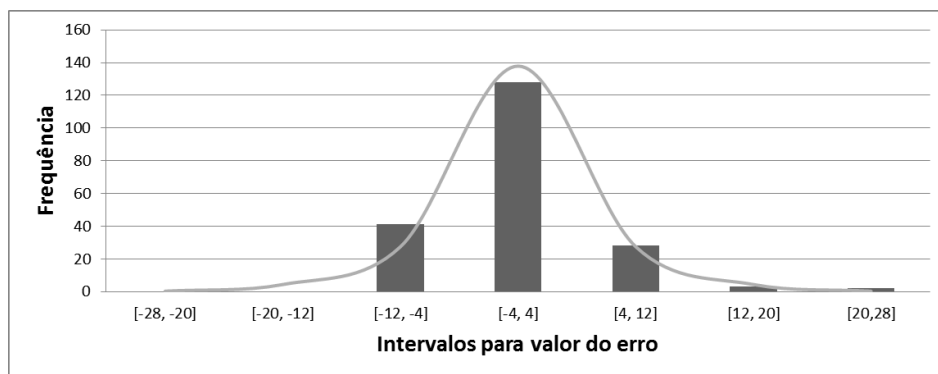


Figura 23 – Distribuição dos erros do modelo de previsão de RPA_V .

4.3.3 Comparação entre modelos de regressão linear múltipla e modelos de redes neurais artificiais

A fase de testes de previsão foi realizada com base em duas metodologias diferentes: regressão linear múltipla (RLM) e redes neurais artificiais (RNA). A comparação dos desempenhos obtidos com cada uma dessas metodologias torna-se necessária, pois pretende-se identificar qual delas permite obter o melhor modelo de previsão do número de recolhas anuais (RPA) para cada um dos três tipos de contentores de ecopontos: papelões (RPA_P), embalões (RPA_E) e vidrões (RPA_V). Na Tabela 12 são apresentados os valores de desvio absoluto médio (DAM) e do coeficiente de determinação (R^2), que foram as medidas escolhidas para avaliar o nível de exatidão dos modelos de previsão obtidos com cada uma das metodologias. Partindo da Tabela 12, constata-se que os modelos baseados em RNA foram superiores aos de RLM na previsão de RPA dos embalões. Em relação à previsão de RPA dos vidrões, a vantagem é dos modelos de RLM. No caso da previsão de RPA dos papelões, as metodologias apresentam desempenhos equilibrados, com valor de DAM superior por parte da RLM, e valor de R^2 mais elevado com as RNAs.

Tabela 12 - Desempenho geral dos modelos de previsão desenvolvidos com as metodologias adotadas.

	MODELOS DE PREVISÃO					
	REGRESSÃO LINEAR			REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS		
	RPA_P	RPA_E	RPA_V	RPA_P	RPA_E	RPA_V
DAM	13.98	26.66	3.79	14.9	26.47	4.87
R^2	0.5019	0.2423	0.4294	0.5693	0.5428	0.3964
FATORES UTILIZADOS	10	6	8	5	5	6

Outra informação que consta na Tabela 12 é o número de fatores que constituem cada modelo. Com esta informação é possível classificar os modelos em termos de complexidade de utilização ou aplicação. Nesta característica a vantagem é da metodologia das RNA, pois para cada uma das três variáveis que se pretendiam estimar foram utilizados menos fatores do que no desenvolvimento dos modelos de RLM.

Finalizando, pode-se considerar que ambas as metodologias apresentam desempenho equiparáveis nas situações testadas, contudo, os modelos de redes neuronais permitem uma abordagem de solução mais fácil ou rápida de aplicar do que a regressão linear para a previsão da geração de resíduos para reciclagem depositados em ecopontos.

4.3.4 Modelo de previsão híbrido

A comparação efetuada entre as duas metodologias usadas nos testes de previsão não evidenciou uma abordagem de solução como sendo substancialmente superior à outra. Observou-se que os modelos finais obtidos com as metodologias RLM e RNA podem por vezes produzir previsões cujos valores se complementam, isto é, existem situações em que uma previsão feita por um modelo RLM pode ser mais exata do que a que foi produzida pelo modelo de RNA, e vice-versa. Com o intuito de explorar a hipótese de obter previsões ainda mais exatas, desenvolveram-se modelos de previsão híbridos, isto é, combinaram-se os resultados obtidos com as metodologias de RLM e RNA. Experimentaram-se diferentes proporções do contributo do *output* de ambos os métodos. Os resultados destas combinações constam na Figura 16, onde estão assinaladas a negrito os valor de *DAM* e R^2 que são superiores aos melhores valores obtidos nos testes gerais com os modelos de RLM e RNA. Observa-se que para RPA_V nenhuma proporção RLM-RNA conseguiu superar os melhores valores de *DAM* e R^2 alcançados anteriormente. Já no caso de RPA_P e RPA_E as proporções 60/40 e 10/90 apresentam respetivamente melhores valores de *DAM* e de R^2 . No geral não se identifica uma combinação que obtenha os melhores valores de *DAM* e R^2 em simultâneo, por isso a existência de um método híbrido de previsão constitui apenas uma alternativa de solução aos modelos de RLM e RNA se se pretender diminuir o valor de *DAM* ou aumentar o R^2 .

Tabela 13 – Resultados obtidos com diferentes combinações do métodos RLM e RNA.

		Proporção RLM-RNA (%)								
		90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90
<i>RPA_P</i>	<i>DAM</i>	13.41	13.06	12.8	12.74	12.85	13.12	13.43	13.84	14.29
	<i>R²</i>	0.51	0.5208	0.5319	0.543	0.55	0.5611	0.5616	0.5695	0.5702
<i>RPA_E</i>	<i>DAM</i>	25.29	24.47	23.8	23.31	23.46	23.8	24.24	24.73	25.37
	<i>R²</i>	0.2549	0.2772	0.309	0.3476	0.3805	0.4306	0.4676	0.4988	0.5237
<i>RPA_V</i>	<i>DAM</i>	3.84	3.9	3.98	4.06	4.15	4.26	4.41	4.56	4.71
	<i>R²</i>	0.4199	0.4113	0.4040	0.3983	0.3944	0.3921	0.3914	0.3921	0.3938

4.3.5 Fator de correção sazonal

O ritmo a que se acumulam resíduos nos contentores dos ecopontos não é constante ao longo das estações do ano. As previsões efetuadas com os modelos de previsão permitem antever o número de recolhas por ano (RPA) para cada contentor. No entanto, quando se pretende utilizar as previsões para efetuar o planeamento de recolhas para um período de tempo menor, como por exemplo um mês, torna-se necessário corrigir as previsões efetuadas para se ajustarem melhor ao ritmo da geração de resíduos para cada mês do ano. De modo a determinar um fator de correção sazonal, primeiro calculou-se o número de recolhas médias mensais (*RMM*), dividindo o total de RPA pelos 12 meses do ano. Depois calculou-se o total de recolhas para cada mês *m* (*TR_m*). O fator de correção mensal (*FCM*) é dado pela Equação (6).

$$FCM = \frac{TR_m}{RMM} \quad (6)$$

Nas Tabelas 14 e 15 apresentam-se os valores obtidos para o fator de correção mensal relativos a cada mês do ano para os concelhos de Amares e Vila Verde. Também se apresentam os valores do fator de correção trimestral, o qual corresponde ao valor médio do *FCM* de cada um dos seguintes trimestres:

- Trimestre 1: Janeiro, Fevereiro e Março;
- Trimestre 2: Abril, Maio e Junho;
- Trimestre 3: Julho, Agosto e Setembro;
- Trimestre 4: Outubro, Novembro e Dezembro.

Tabela 14 – Fatores de correção mensais e trimestrais para o concelho de Amares.

FATOR DE CORRECÇÃO		MESES											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PAPEL	MENSAL	0.86	0.787	0.839	1.051	0.961	0.874	1.243	1.173	1.107	0.916	1.076	1.114
	TRIMESTRAL	0.829			0.962			1.174			1.035		
EMBALAGENS	MENSAL	0.938	0.841	0.877	1.137	1.032	0.869	0.869	1.194	1.105	0.942	1.133	1.06
	TRIMESTRAL	0.885			1.013			1.056			1.045		
VIDRO	MENSAL	1.068	0.766	0.641	0.961	0.89	0.944	0.944	1.816	1.175	1.157	1.068	0.57
	TRIMESTRAL	0.825			0.932			1.312			0.932		

Tabela 15 – Fatores de correção mensais e trimestrais para o concelho de Vila Verde.

FATOR DE CORRECÇÃO		MESES											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PAPEL	MENSAL	1.044	1.015	0.774	0.990	1.044	0.877	1.137	1.011	1.132	1.042	0.960	0.974
	TRIMESTRAL	0.944			0.970			1.093			0.992		
EMBALAGENS	MENSAL	1.018	0.986	0.817	1.054	1.026	0.819	1.097	0.947	1.124	1.165	0.971	0.975
	TRIMESTRAL	0.940			0.967			1.056			1.037		
VIDRO	MENSAL	1.091	1.006	0.722	0.991	0.814	0.776	0.876	1.483	1.206	1.122	1.006	0.907
	TRIMESTRAL	0.940			0.860			1.188			1.012		

Para testar o efeito da aplicação dos fatores de correção, selecionaram-se as previsões de RPA obtidas nos testes apresentados anteriormente neste capítulo com as metodologias adotadas. Primeiro calculou-se o número médio de recolhas por mês (*RPM*) previstas para cada um dos 50 papelões, embalões e vidrões, dividindo os valores de RPA por 12 meses. Posteriormente, para cada contentor, multiplicou-se o valor de *RPM* para cada mês pelo respetivo fator de correção mensal. O mesmo processo foi repetido com os fatores de correção trimestrais. Obtiveram-se os valores corrigidos das previsões obtidas com os modelos RLM e RNA, e calculou-se o desvio absoluto médio (*DAM*) para cada mês com base nos desvios absolutos das previsões corrigidas para os 50 papelões, embalões e vidrões. Estes valores constam nas Tabelas 16 e 17. Nestas tabelas constam também os valores médios de *DAM* anuais (\overline{DAM}). Como se pode observar, a aplicação do fator de correção mensal permite obter um valor mais baixo do \overline{DAM} , tanto com modelos RLM como com modelos RNA, o que resulta em previsões mais exatas para cada contentor e para cada mês. A aplicação do fator de correção trimestral permitiu reduzir o valor do \overline{DAM} no caso dos papelões nas previsões RLM e

RNA, e no caso dos embalões e vidrões nas previsões RNA. No entanto, a redução alcançada foi menor do que com o fator de correção mensal.

Concluiu-se que a aplicação de fatores de correção sazonal permite melhorar a qualidade das previsões dos modelos desenvolvidos, contudo esses fatores devem ser específicos para cada mês do ano. Também se concluiu que as previsões do número de recolhas mensais obtidas com o modelo de RLM são mais exatas, uma vez que os respectivos valores do \overline{DAM} , com ou sem correção, são menores do que os valores resultantes da previsão com o modelo RNA.

Tabela 16 – Valores de DAM após aplicar fatores de correção às previsões obtidas via método RLM.

Desvio Absoluto Médio (DAM)									
MÊS	PAPEL			EMBALAGENS			VIDRO		
	PREVISÃO	CORREÇÃO		PREVISÃO	CORREÇÃO		PREVISÃO	CORREÇÃO	
		MENSAL	TRIMESTRAL		MENSAL	TRIMESTRAL		MENSAL	TRIMESTRAL
Jan	1.433	1.444	1.384	1.723	1.717	1.756	0.607	0.6	0.659
Fev	1.681	1.588	1.591	1.697	1.711	1.767	0.495	0.502	0.549
Mar	1.504	1.248	1.4	1.56	1.515	1.531	0.532	0.515	0.552
Abr	1.495	1.492	1.471	1.735	1.712	1.754	0.568	0.567	0.644
Mai	1.537	1.537	1.511	1.93	1.909	1.961	0.603	0.595	0.635
Jun	1.355	1.283	1.325	1.511	1.542	1.502	0.503	0.485	0.573
Jul	1.727	1.811	1.776	2.282	2.193	2.23	0.573	0.555	0.597
Ago	1.654	1.695	1.712	2.176	2.172	2.197	0.972	0.791	0.934
Set	1.505	1.539	1.537	2.179	2.154	2.162	0.647	0.673	0.704
Out	1.445	1.433	1.463	1.899	1.776	1.869	0.525	0.518	0.601
Nov	1.187	1.16	1.177	1.835	1.837	1.84	0.504	0.506	0.581
Dez	1.56	1.582	1.565	1.753	1.756	1.753	0.564	0.533	0.588
\overline{DAM}	1.507	1.484	1.493	1.857	1.833	1.86	0.591	0.57	0.635

Tabela 17 – Valores de DAM após aplicar fatores de correção às previsões obtidas via método RNA.

Desvio Absoluto Médio (DAM)									
MÊS	PAPEL			EMBALAGENS			VIDRO		
	PREVISÃO	CORREÇÃO		PREVISÃO	CORREÇÃO		PREVISÃO	CORREÇÃO	
		MENSAL	TRIMESTRAL		MENSAL	TRIMESTRAL		MENSAL	TRIMESTRAL
Jan	1.658	1.686	1.657	2.683	2.715	2.589	0.662	0.659	0.675
Fev	1.722	1.647	1.598	2.642	2.625	2.578	0.553	0.549	0.55
Mar	1.49	1.245	1.406	2.668	2.384	2.557	0.565	0.552	0.546

Abr	1.717	1.72	1.695	3.056	3.143	3.009	0.646	0.644	0.649
Mai	1.364	1.364	1.35	3.069	3.084	3.05	0.636	0.635	0.635
Jun	1.443	1.373	1.42	2.68	2.405	2.62	0.595	0.573	0.577
Jul	1.617	1.627	1.599	3.15	3.212	3.18	0.591	0.597	0.619
Ago	1.584	1.551	1.617	2.969	2.892	3.057	1.045	0.934	0.978
Set	1.537	1.576	1.548	3.092	3.22	3.148	0.689	0.704	0.712
Out	1.567	1.559	1.576	3.065	3.304	3.09	0.6	0.601	0.597
Nov	1.36	1.333	1.35	2.918	2.891	2.958	0.579	0.581	0.575
Dez	1.434	1.42	1.425	2.822	2.799	2.858	0.626	0.588	0.618
DAM	1.541	1.509	1.52	2.901	2.89	2.891	0.649	0.635	0.644

4.3.6 Conclusões sobre os testes de previsão

As experiências apresentadas e os testes executados ao longo desta secção tiveram como propósito o desenvolvimento de um modelo de previsão do número de recolhas a efetuar por mês ou por ano para cada tipo de contentor (papelão, embalão e vidro) numa rede de ecopontos. Ao obter estas previsões torna-se possível determinar o ritmo a que se acumulam resíduos nos contentores dos ecopontos, o que pode contribuir para realização de um planeamento de recolhas mais eficiente. Outro propósito dos testes realizados consistiu na identificação de factos importantes para a geração de resíduos.

Foram desenvolvidos modelos de previsão com base em duas metodologias: regressão linear múltipla (RLM) e redes neuronais artificiais (RNA). Os resultados obtidos com ambas as metodologias foram comparados e concluiu-se que os modelos de RNA apresentam um desempenho ligeiramente superior quando se pretende prever o número de recolhas por ano (*RPA*) para cada contentor.

Foi explorada a hipótese de desenvolvimento de um modelo de previsão híbrido que combina as previsões resultantes da aplicação das duas metodologias adotadas (RLM e RNA). Obtiveram-se combinações de previsões resultantes dos modelos RLM e RNA que resultaram numa redução do desvio absoluto médio (*DAM*) para os casos dos papelões e embalões, assim como um aumento do valor do coeficiente de determinação (R^2). No caso dos vidros não foram alcançadas quaisquer melhorias de desempenho das previsões.

Por fim, foi estudada a aplicação de um fator de correção sazonal de modo a corrigir o número de recolhas a efetuar em cada mês do ano para cada contentor de ecoponto. Foram

testados fatores de correção mensais e trimestrais. Os valores de *DAM* decorrentes da aplicação dos fatores de correção mensal foram inferiores aos obtidos com as previsões iniciais dos modelos de RLM e RNA. Os fatores de correção trimestrais nem sempre permitiram reduzir os valores do *DAM* iniciais. Os testes com os fatores de correção permitiram identificar o modelo de previsão de RLM como o mais indicado para prever o número de recolhas mensais para cada contentor de ecoponto pois permite alcançar valores de *DAM* mais baixos do que as previsões obtidas através do modelo de RNA. Assim, em termos de planeamento da recolha de resíduos para efeitos de agendamento mensal das rotas e contentores a recolher, o modelo de previsão de RLM será a opção mais indicada.

CAPÍTULO V

FERRAMENTAS PARA A OTIMIZAÇÃO DE ROTAS

5.1 Modelação do problema

O desenvolvimento de um método de solução para o problema de encaminhamento de veículos (PEV) identificado no âmbito da recolha seletiva de resíduos para reciclagem constitui a tarefa mais central deste trabalho de investigação. Mais especificamente pretende-se modelar e resolver um PEV que inclui múltiplas restrições relacionadas com a atribuição de janelas temporais para cada ponto de recolha de resíduos, bem como para os veículos que executam as recolhas. Outras restrições relativas aos veículos estão relacionadas com a capacidade de carga que é limitada em termos de volume e de peso que podem transportar. Além das restrições mencionadas, a cada rota de recolha é aplicado um limite máximo de duração. Está-se perante um PEV que pode ser visto como uma variante do *team orienteering problem* (TOP) em que se consideram janelas temporais duplas (para os veículos e para o pontos de recolhas), e restrições na capacidade de carga dos veículos. Esta variante pode-se designar como *capacitated team orienteering problem with double time windows* (CTOPdTW).

No CTOPdTW, as janelas temporais dos pontos de recolha definem os intervalos de tempo durante os quais os ecopontos devem ser visitados para recolha. O tempo de serviço, isto é, a duração da recolha em cada ponto, também é contabilizado. As janelas temporais dos veículos correspondem às disponibilidades dos veículos e/ou à duração dos turnos de trabalho.

Um dos objetivos desta tese consiste no desenvolvimento de metodologias para modelar e resolver o problema de encaminhamento de veículos associado ao processo de recolha de resíduos. Foi determinado que o modelo base a aplicar para resolver o problema em questão é o CTOPdTW. Este modelo pode no entanto ser expandido de modo a incluir hipóteses adicionais de modelação que permitam alcançar melhorias na eficiência das rotas de recolha. As hipóteses que pretende explorar são: 1) recolha multi-produto *versus* mono-produto, e 2) frota heterogénea *versus* homogénea.

Tal como no TOP, está implícita a utilização de uma frota limitada de veículos, pois, por regra, é menos vantajoso para a empresa que gere a recolha de RED subcontratar uma empresa de transportes para efetuar rotas adicionais. Cada veículo poderá efetuar mais do que uma rota

durante um turno de trabalho, sendo esta situação modelada convenientemente, ajustando janelas temporais de disponibilidade para cada veículo. Essas rotas devem sempre respeitar todas as restrições ou limitações impostas pelas especificações do problema da recolha. O objetivo geral passa por reduzir os custos associados à execução das rotas e das recolhas, procurando também efetuar uma utilização eficaz da capacidade de carga dos veículos, em termos de peso e ou volume.

Como resultado da tarefa de otimização do encaminhamento dos veículos pretende-se obter uma ferramenta de *software* capaz de determinar soluções para diferentes situações da recolha de RED. O *software* deve ser capaz de funcionar de uma forma independente, mas deve ser desenvolvido de modo a ser facilmente integrado no sistema de apoio à decisão proposto na secção 2.4, de modo a poder interagir com os restantes módulos desse sistema.

5.1.1 Os modelos TOP, TOPTW e TOPdTW

O processo de recolha de RED para reciclagem, assim como foi sugerido anteriormente, pode ser modelado como um caso especial de um PEV denominado problema de orientação de equipas, (*team orienteering problem*, TOP). Constatou-se que uma modelação segundo os princípios do TOP seria uma boa opção, e portanto pretende-se estudar a aplicação desse modelo à recolha de RED.

No TOP considera-se um grafo completo $G = (V, E)$, em que $V = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de vértices, e $E = \{(i, j) | i, j \in V\}$ é o conjunto de segmentos. Cada vértice i em V tem uma recompensa r_i associada. O ponto de partida é o vértice 1, e o de chegada é vértice n , sendo n o número total de vértices. Para cada segmento (i, j) em E existe um custo associado d_{ij} , correspondente à distância entre os vértices i e j , ou à duração do trajeto entre eles. O número de veículos disponíveis é denotado por m . Nestas condições, resolver o TOP consiste em determinar m rotas que se iniciam no mesmo local e têm o mesmo destino final, de modo a maximizar o total de recompensas dos vértices visitados. As rotas geradas são atribuídas a uma frota restrita de veículos, geralmente uma rota para cada veículo disponível. Cada rota tem uma duração máxima T_{max} , por isso é indiferente considerar T_{max} como uma restrição de tempo ou distância. Assume-se que a duração de uma rota é diretamente proporcional à distância percorrida pelo veículo que a executa. Cada vértice pode ser visitado no máximo uma vez e por apenas um veículo.

A formulação matemática do TOP para o problema de recolha de RED pode ser apresentada de acordo com as Equações de (7) a (15). Nesta formulação, considera-se que $y_{ik} = 1$ ($i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m$) indica que o vértice i é visitado pelo veículo k , e caso não o seja, então $y_{ik} = 0$. Considere-se também $x_{ijk} = 1$ ($i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m$) se o veículo k passa pelo segmento (i, j) , se não $x_{ijk} = 0$. Seja U um subconjunto de V . Segue a formulação proposta:

$$\text{maximizar } \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{k=1}^m r_i \cdot y_{ik} \quad (7)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=2}^n \sum_{k=1}^m x_{1jk} = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^m x_{ink} = m \quad (8)$$

$$\sum_{i<j} x_{ijk} + \sum_{i>j} x_{ijk} = 2y_{jk} \quad (j = 2; \dots, n-1; k = 1, \dots, m) \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=2}^{n-1} y_{ik} \leq 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} d_{ij} x_{ijk} \leq T_{max} \quad (k = 1, \dots, m) \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j<i} d_{ij} x_{ijk} \leq T_{max} \quad (k = 1, \dots, m) \quad (12)$$

$$\sum_{\substack{i,j \in U \\ i<j}} x_{ijk} \leq |U| - 1 \quad (U \subset V \setminus \{1, n\}; 2 \leq |U| \leq n-2; k = 1, \dots, m) \quad (13)$$

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

$$y_{1k} = y_{nk}, \quad y_{ik} \in \{0,1\} \quad (i = 2, \dots, n-1; k = 1, \dots, m) \quad (15)$$

A função-objetivo do problema de otimização combinatoria é dada pela equação (7). A restrição (8) assegura que cada veículo começa no vértice 1 e termina no último vértice (n). A restrição (9) assegura a conectividade de cada rota. A restrição (10) impõe que cada vértice (excepto o primeiro e o último) podem ser visitados no máximo uma vez e por um só veículo. As

restrições (11) e (12) descrevem as limitações de tempo. A restrição (13) impõe a proibição da geração de sub-rotas. Por fim as restrições (14) e (15) asseguram a integralidade das variáveis.

No caso particular do TOP aplicado à recolha RED, a função-objetivo do modelo passa a ser dada pela Equação (16). Neste caso, o valor de recompensa associado a cada vértice do grafo (r_i) passa a ser designado por Pontos de Prioridade (PP_i) que denotam o nível de urgência em recolher os resíduos contidos no ponto de recolha i . A Equação (17) permite calcular o valor de PP para um determinado contentor (papelão, embalão, vidro) do ponto de recolha i com base nos valores de: quantidade atual de resíduos acumulados (Qa_i), quantidade de resíduos que se acumula diariamente (Qd_i), e capacidade volumétrica de i (CAP_i).

$$\text{maximizar } \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{k=1}^m PP_i \cdot y_{ik} \quad (16)$$

$$PP_i = \frac{Qa_i + Qd_i \times 3}{CAP_i} \quad (17)$$

Cada contentor em cada ecoponto tem o seu próprio ritmo de enchimento, e isso leva ao estabelecimento de um período de tempo ótimo para a recolha dos resíduos. A Braval apenas descarrega os contentores quando estes se encontram pelo menos 50% cheios. É de evitar que os contentores fiquem um tempo significativo sem serem esvaziados, especialmente quando o seu ritmo de enchimento é elevado, pois além de não ser um procedimento apropriado (um produto “parado” não rende), leva a que se acumulem resíduos fora dos contentores, o que em termos ambientais e estéticos é reprovável. Assim sendo, as rotas devem ser otimizadas de modo a lidarem com estes intervalos de tempo ótimo de recolha de resíduos. Em termos de modelação no contexto dos problemas de encaminhamento de veículos, estes intervalos de tempo durante os quais os veículos devem visitar um determinado vértice num grafo designam-se por janelas temporais, ou em inglês *time windows*. As janelas temporais podem impor limites de tempo rígidos, *hard time windows*, ou flexíveis, *soft time windows*. No primeiro caso, como se subentende, os limites de tempo têm de ser cumpridos impreterivelmente, e tal implica que um contentor de ecoponto seja recolhido obrigatoriamente durante o intervalo de tempo estabelecido. No caso das janelas temporais flexíveis, quando o intervalo de tempo não é respeitado, é aplicada uma penalização.

No TOP, ao considerar a existência de janelas temporais associadas aos vértices, passa-se a ter um modelo designado TOP *with time windows*, ou simplesmente TOPTW. Em termos de

modelo matemático para o TOPTW, considera-se de novo um grafo completo $G = (V, E)$, onde a cada vértice i está associada uma janela temporal $[A_i, F_i]$ com um tempo de abertura A_i e um tempo de fecho F_i . Existe um tempo de serviço ou de visita para cada vértice, o qual se representa por T_i . Com base nesta notação e na apresentada para o TOP, adoptou-se a formulação descrita nas Equações de (18) a (26). Nesta formulação, seja s_{ik} o instante de tempo em que se inicia a visita de um vértice i na rota k , e M é um valor constante de grande dimensão.

$$\text{maximizar } \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{k=1}^m PP_i \cdot y_{ik} \quad (18)$$

sujeito a:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=2}^{n-1} x_{1jk} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} x_{ink} = m \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} x_{ipk} = \sum_{j=2}^n x_{pjk} = y_{pk} \quad (p = 2, \dots, n-1; k = 1, \dots, m) \quad (20)$$

$$s_{ik} + T_i + d_{ij} - s_{jk} \leq M(1 - x_{ijk}) \quad (i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=2}^{n-1} y_{ik} \leq 1 \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i y_{ik} + \sum_{j=2}^n d_{ij} x_{ijk} \right) \leq T_{max} \quad (k = 1, \dots, m) \quad (23)$$

$$A_i \leq s_{ik} \quad (i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (24)$$

$$s_{ik} \leq F_i \quad (i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (25)$$

$$x_{ijk}, y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (26)$$

A função-objetivo para o TOPTW aplicado à recolha de RED está representada na Equação (18). A restrição em (19) garante que todas as rotas começam no vértice 1 e terminam no vértice n . As restrições em (20) e (21) determinam a conectividade e a sequência temporal em cada rota. Em (22) assegura-se que cada vértice pode ser visitado apenas uma vez e por um só veículo. A restrição (23) impõe a limitação da duração máxima de cada rota. Nas restrições (24) e (25) limitam o início do tempo de visita ao intervalo da janela temporal. A restrição (26) garante-se a integralidade das variáveis x e y .

Uma limitação que pode ser adicionalmente considerada na modelação do problema da recolha de RED como um TOPTW é a introdução de janelas temporais para os veículos, ou seja, intervalos de tempo que determinam a disponibilidade que cada veículo tem para efetuar rotas de recolha em cada dia. Por exemplo, no momento em que se efetua o planeamento de rotas para um determinado período de tempo, alguns dos veículos da frota podem estar indisponíveis durante uma ou mais partes desse período. A este modelo atribuiu-se o nome de TOP *with double time windows*, ou simplesmente TOPdTW. A formulação matemática do TOPdTW é idêntica à do TOPTW, sendo apenas necessário incluir as restrições apresentadas nas Equações (27) e (28), onde Va_k corresponde ao instante de tempo em que abre a janela temporal do veículo k , e Vf_k indica o momento de fecho dessa mesma janela temporal.

$$Va_k + d_{ij}x_{ijk} - s_{jk} \leq M(1 - x_{ijk}) \quad (i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (27)$$

$$s_{ik} + T_i + d_{in}x_{ink} - s_{jk} \leq Vf_k + M(1 - x_{ink}) \quad (i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (28)$$

5.1.2 Os modelos CTOP, CTOPTW e CTOPdTW

No modelo do TOP não é considerada uma limitação característica dos veículos que é a sua capacidade de carga. Cada camião tem uma capacidade máxima em termos de peso de carga que consegue transportar, e tem igualmente um limite de capacidade volumétrica, ou seja, pode transportar resíduos até perfazer um certo volume, quer utilize um contentor de carga do tipo caixa aberta (caixa sem teto) ou caixa fechada. De modo a ser possível modelar o problema da recolha seletiva levando em consideração as limitações relativas à capacidade de carga, o modelo do TOP deve ser expandido para *capacitated team orienteering problem*, ou simplesmente CTOP. A formulação matemática do CTOP é idêntica à do TOP, e apenas se acrescenta a restrição (29) por cada limitação existente (peso, volume, área, etc.):

$$\sum_{i=2}^{n-1} Q_i \cdot y_{ik} \leq C_{max} \quad (29)$$

Ao considerar o modelo do CTOP para o problema da recolha seletiva, torna-se natural a expansão deste modelo para as variantes em que também se incluem janelas temporais para os ecopontos (CTOPTW), e para os veículos (CTOPdTW). Os modelos matemáticos CTOPTW e CTOPdTW resultam das formulações apresentadas do TOPTW e TOPdTW, mas incluindo a restrição (29).

Analisando as diversas variantes do TOP e os respetivos modelos matemáticos apresentados, concluiu-se que o modelo CTOPdTW permite modelar de forma mais completa o problema real do encaminhamento de veículos para recolha seletiva de resíduos.

5.1.3 Recolha Multi-Produto – Modelo CTOPTW-MPC

Na recolha de RED existem três tipos diferentes de contentores: papelões, embalões e vidrões. Uma hipótese de modelação que se pretende aprofundar para o problema de recolha de RED consiste em incluir no modelo do CTOPdTW a possibilidade de numa mesma rota um veículo poder recolher resíduos que estejam depositados em qualquer um dos três tipos de contentores. Ao permitir uma recolha de diferentes tipos de resíduos com um mesmo veículo na mesma rota, estamos perante um novo modelo de encaminhamento de veículos com recolha multi-produto: o *capacitated team orienteering problem with double time windows and multi-product collection*, ou apenas CTOPdTW-MPC. Até onde o autor tem conhecimento, e até à data de escrita desta tese, não existe na literatura científica nenhum estudo em que se apresente um modelo igual ao CTOPdTW-MPC. Existem no entanto abordagens de recolhas multi-produto em diversas publicações, mas nenhuma se refere ao caso do TOP, mas sim a outras variantes do VRP. Em relação à aplicação de modelos de recolha multi-produto no contexto da recolha seletiva de resíduos existem alguns trabalhos como [78][79][80], mas incidem apenas sobre o modelo VRP.

Nesta tese pretende-se explorar a aplicação da estratégia de recolha de resíduos em modo multi-produto, e averiguar se podem ser alcançadas melhorias. A estratégia da empresa Braval, já inclui um tipo de recolha multi-produto, em que um mesmo veículo recolhe dois tipos de resíduos em simultâneo, mais especificamente os que são depositados nos papelões e embalões. Esta situação ocorre nas recolhas realizadas em todos os concelhos da área de operações da Braval, excepto nas freguesias mais centrais do concelho de Braga.

Nas infraestruturas da Braval existe uma secção de triagem automática que foi concebida para a separação de resíduos oriundos do papelão e do embalão. A instalação deste equipamento deveu-se ao facto de os cidadãos colocarem por vezes resíduos que seriam para o embalão no papelão, e vice-versa. Em princípio no caso da Braval não fará sentido explorar a recolha multi-produto com os três tipos de resíduos. Os ritmos de enchimento dos vidrões são muito mais lentos que os dos papelões e dos embalões, e por isso será pouco frequente acontecerem situações de recolha dos três tipos de resíduos numa mesma rota de um veículo.

Contudo, será interessante averiguar se a recolha multi-produto levada a cabo pela Braval é realmente uma estratégia adequada e se permite maior poupança do que realizar recolha simples (ou mono-produto), executando somente rotas dedicadas à recolha de um único tipo de resíduos de cada vez.

5.1.4 Frota Heterogénea – Modelo CTOPdTW-HF

As empresas que efetuam a recolha seletiva de resíduos podem ter ao seu dispor dois tipos de frota: homogénea e heterogénea. Pode-se afirmar que uma frota homogénea é constituída por veículos iguais em todas as características físicas e funcionais tal como a capacidade de carga, o consumo de combustível, a capacidade do reservatório de combustível, altura, comprimento, entre outras. Contudo, o que é observado mais frequentemente é a existência de uma frota heterogénea, em que os veículos diferem uns dos outros em pelo menos uma característica importante. No caso da Braval, a frota é heterogénea. Existem casos em que dois veículos são em tudo semelhantes, mas um deles possui compactador de carga e o outro não, ou então existem veículos com a mesma capacidade de carga mas diferente consumo de combustível. Uma diferença mais notória que permite distinguir facilmente os veículos é a capacidade de carga. A razão para existirem veículos que executam tarefas iguais com diferentes capacidades é a necessidade de efetuar recolhas com diferentes propósitos. Por vezes pode ser necessário efetuar poucas recolhas numa zona, quando alguns ecopontos ficam cheios mais rápido do que outros, e basta enviar um veículo com menos capacidade de carga para realizar essa tarefa. Por exemplo, segundo o plano estratégico da Braval, a recolha é feita por concelho individualmente, sendo que um veículo que vai recolher ecopontos em Braga não irá recolher ecopontos em Amares na mesma rota. Em Braga geram-se quantidades maiores de resíduos do que em Amares, e por isso utilizam-se veículos com maior capacidade de carga.

A gestão de uma frota homogénea é mais fácil do que a de uma frota heterogénea, no sentido em que se os veículos têm os mesmos consumos de combustível e a mesma capacidade de carga. Torna-se mais fácil a modelação matemática do problema da recolha de RED, bem como a elaboração de um algoritmo que resolva o modelo desenvolvido. A utilização de uma frota heterogénea pode ter vantagens, pois oferece mais flexibilidade do que uma frota homogénea perante situações de recolha que saem fora da norma, ou que são mais específicas. Nestes casos é mais vantajoso a utilização de veículos com diferentes capacidades ou consumos de combustível, pois ajustam-se às diferentes situações e necessidades, permitindo por vezes

maior poupança de combustível e diminuição de custos. Considere-se um exemplo de recolha em que é necessário recolher $20 m^3$ de resíduos em duas rotas. Existe uma frota homogénea de dois veículos com capacidade de $15 m^3$ cada um e consumo de combustível idêntico. Outra frota considerada inclui um veículo com $15 m^3$ igual aos da frota homogénea, e o outro veículo possui capacidade de $7 m^3$ e tem um consumo de combustível duas vezes menor que o primeiro. Aparentemente, a utilização da frota heterogénea será a opção mais eficiente e com menor custo em combustível, pois a soma das capacidades dos veículos é superior a $20 m^3$, e a rota efetuada com o veículo mais económico permite poupar metade do combustível. Cenários como o do exemplo dado podem ocorrer com frequência. Porém, a nível operacional nem sempre será vantajoso a opção da frota heterogénea.

No caso do TOP, na sua descrição clássica, assume-se a existência de uma frota homogénea de veículos. Contudo, no contexto da recolha de resíduos, o conceito de frota heterogénea constitui interesse para inclusão na modelação, pois aproxima mais o modelo ao PEV real identificado. De modo a estudar a aplicação do conceito de frota heterogénea, o modelo CTOPdTW será expandido para CTOPdTW-HF, ou por extenso *capacitated team orienteering problem with double time windows and heterogeneous*. Posteriormente, este modelo será testado na resolução de situações reais de recolha com dados da empresa Braval, aplicando a abordagem da frota heterogénea para comparar com a utilização de uma frota homogénea.

5.2 Metodologias adotadas

A aplicação de modelos compactos de programação linear inteira para resolver o TOP está ainda limitada a instâncias de pequena dimensão em termos de vértices considerados no grafo. Atualmente é apenas possível alcançar soluções ótimas para instâncias com cerca de 100 vértices, por aplicação de métodos exatos de solução. Os métodos de solução exata têm uma limitação no que diz respeito ao tempo de cálculo da solução, isto é, o tempo de processamento que é necessário para alcançar a solução exata para o problema. O tempo de processamento é normalmente elevado, e para aplicações a problemas reais normalmente é necessário obter soluções em tempo útil. Em relação aos problemas de encaminhamento de veículos, a resposta em tempo útil pode ir de poucos segundos alguns minutos. Deste modo, o recurso à metodologia exata não constitui à partida uma opção viável de resolução.

O problema da recolha de resíduos de embalagens domésticas (RED) inclui normalmente instâncias bastante grandes, com centenas ou milhares de pontos de recolha de resíduos

(vértices). No caso da empresa Braval, esta gere uma rede com mais de 1200 ecopontos, e como cada ecoponto possui normalmente três contentores (papelão, embalão e vidro), um total aproximado de 3600 contentores irão funcionar como vértices em instâncias do TOP que serão desenvolvidas para obter soluções de recolha de RED para a referida empresa. Assim sendo, espera-se claramente que surjam instâncias com mais do que 100 vértices, e portanto, a aplicação de métodos heurísticos, mais especificamente os métodos meta-heurísticos, será a via a seguir em termos de metodologia.

As abordagens heurísticas permitem a obtenção de soluções aproximadas em tempo útil, que é uma questão importante dada a necessidade de obtenção de soluções em tempo reduzido no âmbito do problema da recolha de RED. As decisões para este problema real tomam-se dia a dia, e por vezes mais do que uma vez no mesmo dia, dado a necessidade de serem feitos ajustes aos planos iniciais.

As heurísticas construtivas são técnicas dependentes do problema. São normalmente adaptadas ao problema que pretendem resolver e tentam obter vantagem das particularidades desse problema. No entanto, as heurísticas construtivas são métodos “gulosos” pois procuram obter soluções de uma forma demasiado intensiva e por isso mesmo é muito comum determinarem apenas soluções sub-ótimas, ou valores ótimos locais, e por conseguinte falham no objetivo de obter uma solução ótima global. Os métodos metaheurísticos, por sua vez, são técnicas de resolução independentes do problema a que são aplicadas. As metaheurísticas não obtêm vantagem de nenhuma especificidade do problema, podendo funcionar como “caixas negras”, onde parâmetros de entrada, independentemente do contexto, são processados de igual forma e permitem determinar soluções. Normalmente as metaheurísticas não são métodos “gulosos”, e durante o processo de otimização de um problema permitem que ocorram deteriorações temporárias da solução. Desta forma é possível explorar de uma forma mais completa o domínio (espaço) de soluções para o problema, aumentando a possibilidade de obter soluções próximas da solução ótima global, ou mesmos coincidir com esta. Contudo, apesar das metaheurísticas serem independentes do problema, é no entanto essencial que se efetue uma afinação dos seus parâmetros para uma melhor adaptação ao problema que se pretende resolver.

Existe um elevado número de métodos metaheurísticos que podem ser usados para obter soluções para o VRP ou o TOP. Uma classe de interessante destes métodos são os algoritmos evolucionários (AE). Os AE podem ser definidos como técnicas metaheurísticas de pesquisa que

imitam os princípios da evolução que se observam na natureza. Normalmente, estes algoritmos têm como alvo um conjunto (população) de soluções concorrentes para um certo problema de otimização, e seguindo regras de seleção e transformação, essas soluções evoluem para níveis superiores de aptidão (*fitness*). O processo de evolução ocorre através da aplicação de operadores de transformação que geram novos elementos (soluções) da nova população a partir de um número arbitrário de elementos da população de soluções imediatamente anterior. Existe um período de pesquisa heurística no processo de evolução, e espera-se que durante este sejam sempre encontradas melhores soluções. De modo a atingir esse objetivo, é necessário que os operadores de transformação se foquem mais em elementos da população com níveis de aptidão mais elevados. Alguns exemplos de operadores de transformação são: a replicação, em que se copia um elemento da população atual para a nova sem ocorrerem alterações); mutação, onde o código genético de um indivíduo é alterado de acordo com uma certa probabilidade; cruzamento (*crossover*), em que partes de dois (ou mais) indivíduos são combinadas para formar um ou mais novos indivíduos.

A aplicação de um AE normalmente simplifica a modelação de problemas complexos, e estes algoritmos podem ser facilmente combinados com outros métodos de otimização, originando métodos híbridos. Alguns exemplos da aplicação de algoritmos evolucionários para o TOP e TOPTW são respetivamente os trabalhos de Bouly et al. [18] e Labadie et al. [59].

O trabalho descrito nesta tese está relacionado com o projeto GATOP (*Genetic Algorithm for Team Orienteering Problem*), e a escolha do método de resolução para se efetuar a otimização do encaminhamento de veículos recaiu nos algoritmos genéticos (AG). Os AG pertencem à classe dos algoritmos evolucionários (AE). Os AG são métodos muito eficientes e amplamente aplicados na área de otimização de rotas e encaminhamento de veículos. Trabalhos como [18][53][59][29] demonstram aplicações de sucesso dos algoritmos genéticos no contexto do TOP.

5.2.1 Algoritmo Genético – Descrição geral

Um algoritmo genético (AG) é um método metaheurístico que imita o processo natural de evolução à semelhança do que se acredita que ocorre em todas as espécies de seres vivos. Usando técnicas evolucionárias inspiradas na natureza como mutação, cruzamento, herança genética e seleção natural, um AG consegue gerar soluções para problemas de otimização.

Num algoritmo genético, existe uma população de indivíduos (soluções) representados por cromossomas. Um cromossoma é constituído por uma cadeia de genes, e cada gene contém

informação específica do problema a resolver. Cada cromossoma representa um indivíduo e codifica uma solução candidata para um dado problema. A concepção de um AG requer uma representação genética do domínio das soluções, bem como uma função de aptidão (*fitness function*) para avaliar a qualidade das soluções produzidas. A representação genética é uma forma de denotar ou representar uma solução para o problema. A função de aptidão permite quantificar a qualidade das soluções, ou seja, determinar os respectivos níveis de aptidão após serem decodificadas.

Os indivíduos presentes na população irão evoluir ao longo de ciclos de transformações num processo evolutivo; posteriormente darão lugar a novos indivíduos com níveis de aptidão superiores, os quais conseqüentemente encerram no seu código genético melhores soluções que as iniciais. O processo evolutivo inclui a execução de cruzamentos entre indivíduos, a ocorrência de mutações em indivíduos, entre outras possíveis transformações, e ainda a seleção de indivíduos que constituem as sucessivas populações. O AG controla a execução do processo evolutivo e assegura a validação dos cromossomas de acordo com as restrições inerentes ao problema de otimização que se pretende resolver. O AG avalia a qualidade das soluções obtidas em cada ciclo de evolução, e após executar um número máximo de ciclos previamente estabelecidos, apresenta a melhor solução obtida, ou um conjunto de melhores soluções.

Relativamente aos operadores genéticos, os mais utilizados são o cruzamento e a mutação. Estes operadores contribuem para a introdução de diversidade genética na população e promovem a evolução dos indivíduos para níveis superiores de aptidão (e de qualidade de solução). A operação de mutação consiste na alteração de um ou mais genes de um indivíduo, o que muito provavelmente irá resultar na codificação de uma solução diferente mas próxima da solução original, proporcionando uma pesquisa local implícita. Ao mesmo tempo, com a mutação pretende-se recuperar alelos que possam ter sido perdidos no processo evolutivo, atrasando a convergência prematura. A operação de cruzamento é processo em que ocorre a combinação de genes de dois (ou mais) indivíduos designados progenitores, dando origem a novos indivíduos (ou cromossomas) designados descendentes. Acredita-se que com este procedimento os cromossomas descendentes herdaram os bons genes dos progenitores, e podem deste modo atingir níveis de aptidão mais elevados, e que por conseguinte se irá traduzir em soluções de melhor qualidade.

O processo evolutivo num AG consiste em seis fases (ou etapas) principais, ao longo das quais os indivíduos evoluem e se traduzem em soluções de melhor qualidade para o problema que se pretende resolver. As referidas fases são as seguintes:

- **Inicialização:** Uma população de indivíduos (soluções) é gerada, normalmente de forma aleatória, com base em informação específica do problem, ou não;
- **Avaliação:** Consiste na determinação do nível de aptidão de um indivíduo. Ocorre após a fase de inicialização e também sempre que novos indivíduos surgem na população;
- **Seleção:** Sucessivamente, uma parte de cada população é selecionada com base na sua aptidão, a fim de produzir uma nova população e, provavelmente, melhor adaptada ao seu meio ambiente (problema). É uma prática comum favorecer a seleção dos indivíduos com aptidão mais elevada;
- **Recombinação ou Cruzamento:** Os indivíduos selecionados no passo anterior (progenitores) produzem a próxima geração de indivíduos (descendentes) através de operadores genéticos como cruzamento ou mutação, propagando por herança genética as mudanças mais importantes para as futuras gerações. Idealmente pretende-se que cada descendente obtido que não seja idêntico a nenhum dos seus progenitores, mas sim que obtenha deles boa informação genética que lhe garanta níveis mais elevados de aptidão;
- **Mutação:** Processo em que ocorre modificação genética num indivíduo, ou seja, a informação contida em um ou mais genes do seu cromossoma sofre alteração;
- **Substituição:** No final de cada iteração do processo evolutivo, a população que foi progenitora, ou parte dela, é substituída pelos seus descendentes seguindo critérios específicos;
- **Término:** Uma vez atingido o critério de paragem, o processo evolutivo termina e obtém-se a solução final, um conjunto de soluções finais de boa qualidade.

Funcionamento generalista de um algoritmo genético

Existem diversas versões de algoritmos genéticos, mas o funcionamento generalista de um AG segue os seguintes passos:

- 1) Gerar a população inicial de indivíduos;
- 2) Avaliar o nível de aptidão de cada indivíduo;

- 3) Repetir até a condição de término ser alcançada (p.ex. tempo limite, número máximo de ciclos, valor suficiente de aptidão alcançado, etc.);
 - a) Selecionar indivíduos para o processo de cruzamento;
 - b) Executar cruzamentos;
 - c) Selecionar indivíduos para aplicação de mutações;
 - d) Avaliar o nível de aptidão dos novos indivíduos obtidos com cruzamentos e mutações;
 - e) Substituir os indivíduos com nível de aptidão mais baixo pelos novos indivíduos seguindo uma política de substituição específica.

Adaptabilidade e flexibilidade de aplicação do algoritmo genético

O conhecimento específico de um problema é necessário para se desenvolver e aplicar estruturas de vizinhanças mais adequadas em métodos baseados em pesquisa local, como acontece na maioria dos métodos heurísticos, e em particular nas metaheurísticas de solução única, nomeadamente pesquisa tabu (*Tabu Search*), pesquisa por arrefecimento simulado (*Simulated Annealing*), pesquisa em vizinhança variável (*Variable Neighborhood Search*), entre outros.

Um AG é um método apto a ser aplicado em problemas onde se tem pouco conhecimento específico do problema. Contudo, apesar da elevada flexibilidade de aplicação e adaptabilidade dos AG em relação aos problemas a que são aplicados, o conhecimento específico de um problema é importante e útil, pois permite o desenvolvimento de operadores genéticos (cruzamento e mutação) mais eficazes e eficientes para esse problema. Porém, mesmo com operadores genéticos, e independentemente do problema, um AG é capaz de “otimizar”, isto é, consegue melhorar as soluções iniciais e fornecer soluções de boa qualidade. Assim, para uma primeira aproximação a um “novo” problema, ou a um problema para o qual a equipa de investigadores não possui ainda muito conhecimento específico do problema, o algoritmo genético é sempre uma boa opção de escolha. Contudo, num AG, é ao nível da descodificação das soluções que se pode retirar maior proveito do conhecimento específico do problema, desenvolvendo mecanismos que permitem explorar a eficiência do algoritmo em obter soluções mais atrativas para o problema.

O facto de o AG ser um método populacional, isto é, um método de pesquisa que em cada iteração lida com um conjunto de soluções (a população), facilita a cobertura do espaço de soluções e a obtenção de soluções de boa qualidade em problemas de otimização combinatória. Por seu lado, os métodos de solução única lidam em cada iteração somente com uma solução

corrente e com a vizinhança dessa solução, pelo que a cobertura eficaz do espaço de soluções depende fortemente do conhecimento específico que se tem do problema.

5.2.2 Aplicação de algoritmos genéticos ao TOP e à recolha de RED

Em termos de representação genética nos algoritmos genéticos, tradicionalmente usam-se cadeias de *bits* para representar cromossomas, os quais contêm apenas valores binários. Em algoritmos mais recentes, tornou-se mais comum utilizar cromossomas específicos para cada problema de otimização.

No que diz respeito ao problema da recolha de RED modelado como um TOP, optou-se por utilizar cadeias de números reais naturais para representar cromossomas, por se tratar de um problema onde a solução é uma permutação dos vértices de um grupo. No TOP, existe um grafo com n vértices. Ao aplicar o conceito do algoritmo genético ao TOP, um cromossoma pode ser composto por n genes, um para cada vértice, embora possa haver outras configurações com mais ou menos genes. No caso da recolha de RED, cada gene irá corresponder a um ponto de recolha (ecoponto ou contentor). O gene i de um cromossoma corresponde ao vértice i no grafo (ou ao ponto de recolha i na rede de pontos de recolha). Cada gene possui um alelo associado que identifica o nível de prioridade do respetivo vértice em ser considerado pelo AG para integrar uma das rotas da solução.

Ao aplicar os conceitos de um algoritmo genético para resolver o problema da recolha de RED modelado como um TOP, assumiu-se que:

- Há um conjunto de n pontos de recolha que devem ser visitados, no máximo, uma vez e por um único veículo;
- Cada ponto de recolha de RED é representado por um vértice num grafo;
- Uma frota de m veículos está disponível num depósito;
- O depósito é representado por um vértice num grafo;
- Um cromossoma codifica uma solução possível, a qual corresponde a um conjunto de m rotas;
- Cada gene representa um ponto de recolha de RED, ou seja, um contentor de ecoponto, e está associado ao vértice respectivo do grafo;
- Um gene tem associado um alelo que corresponde à prioridade do ponto de recolha em ser visitado.

Relativamente à função de aptidão, para o caso específico da recolha de resíduos, esta foi configurada de modo a corresponder à soma dos pontos de prioridade contabilizados nas rotas, isto é, corresponde à soma dos pontos de prioridade (*PP*) associados aos contentores de ecoponto recolhidos pelo total de veículos.

O algoritmo construtivo

A aplicação de um AG implica normalmente a utilização de um procedimento construtivo para interpretar ou decodificar o cromossoma, uma vez que a cada iteração do algoritmo (ou geração), surge uma população renovada de indivíduos (cromossomas), isto é, um novo conjunto de soluções codificadas é produzido. Além de incorporar o modelo do TOP, o AG deve possuir um elemento que permite a tradução do código genético de um cromossoma para uma solução para o problema. Portanto, este elemento decodifica cada cromossoma e determina um conjunto de rotas de acordo com o modelo do TOP. O elemento que permite a associação de um cromossoma (simples cadeia de caracteres) a uma solução é entendido como um algoritmo construtivo (AC).

Considerando o TOP, o AC constrói uma solução pela leitura dos alelos presentes nos genes do cromossoma. Este procedimento pode ser realizado de várias maneiras e com diferentes técnicas, mas, essencialmente, consiste na adição de vértices (pontos de recolha) para as rotas de tal maneira que, quando um vértice v é adicionado: 1) o vértice v não pertence a uma outra rota dentro da solução atual; 2) é possível ir do último vértice adicionado ao vértice v e de v diretamente para o vértice final, sem violar o limite de tempo. Após serem decodificadas as soluções, cada uma contém um conjunto de rotas, e cada rota consiste numa sequência de vértices que deve ser visitada dentro dum certo limite de tempo.

5.3 Ferramentas de *software* desenvolvidas

A aplicação da metodologia dos algoritmos genéticos para resolver problemas modelados como um TOP foi concretizada através do desenvolvimento de diversas ferramentas de *software*. Estas ferramentas foram desenvolvidas com base nas linguagens de programação JAVA e C++. Inicialmente foram desenvolvidos e codificados dois algoritmos em JAVA aos quais se atribuíram o nome de GATOP-1 e GATOP-2. O GATOP-1 foi programado no IDE NetBeans, e o GATOP-2 foi programado no IDE Eclipse. Estes algoritmos foram testados usando instâncias públicas do TOP disponíveis em [102], e o desempenho de cada um foi avaliado e comparado com os resultados

reportados por outros autores que desenvolveram algoritmos para resolver TOP e que alcançaram as melhores soluções conhecidas para as referidas instâncias públicas. As experiências com as ferramentas GATOP-1 e GATOP-2 resultaram em três publicações, nomeadamente [36][37][72].

Posteriormente ao desenvolvimento e teste das ferramentas GATOP-1 e GATOP-2 realizaram-se estudos exploratórios utilizando quatro diferentes plataformas (*frameworks*) de *software* orientadas para o desenvolvimento de algoritmos evolucionários e genéticos. As *frameworks* testadas foram as seguintes:

- ParadisEO 2.0 – *Software Framework for Metaheuristics* [75] – C++;
- GAlib – *Genetic Algorithm Library* [39] – C++;
- BRKGA *Framework* [21][103] – C++;
- JCELL – *Software Framework for Genetic Algorithms* [49] – JAVA.

O objetivo de explorar estas *frameworks* consistiu em averiguar qual a que oferece melhores ferramentas para codificar um algoritmo genético e permite alcançar melhor desempenho em relação às ferramentas GATOP-1 e GATOP-2. As instâncias de teste do TOP serviram de novo como medida de comparação para os algoritmos desenvolvidos com cada uma das *frameworks*, e a que se revelou como melhor opção foi a plataforma JCELL. Posteriormente desenvolveram-se as seguintes ferramentas com recurso à plataforma JCELL:

- GATOP-3: Algoritmo genético geracional para o TOP e outras variantes
- cGA-TOP: Algoritmo genético celular (*cellular genetic algorithm* – cGA) para o TOP e outras variantes

Nas seguintes secções deste capítulo serão descritas em maior pormenor as diferentes ferramentas de *software* desenvolvidas com base na metodologia dos algoritmos genéticos. A descrição incide essencialmente no tipo de modelo TOP implementado, no algoritmo construtivo e no tipo de estratégia evolutiva do AG. As ferramentas de *software* são apresentadas em dois grupos: as que se baseiam num AG com estratégia evolutiva do tipo geracional, e as que se baseiam num AG com estratégia evolutiva do tipo celular.

5.3.1 Algoritmos Genéticos Geracionais

5.3.1.1 Algoritmo GATOP-1

A primeira abordagem explorada nesta investigação relativamente à aplicação da metodologia dos algoritmos genéticos ao TOP consistiu no desenvolvimento da ferramenta denominada GATOP-1. E termos de programação, a linguagem JAVA foi escolhida para codificar o algoritmo e criar um *software* executável e apto para solucionar instâncias do TOP. O *software* foi desenvolvido recorrendo ao IDE NetBeans.

Nesta abordagem, a representação genética do cromossoma consiste em vários sub-cromossomas, ou seja, várias cadeias de caracteres em paralelo, em que cada cadeia está relacionada com um veículo e respetiva rota. Se existirem m veículos disponíveis numa dada instância do TOP, então cada cromossoma é constituído por m sub-cromossomas. O gene i de um sub-cromossoma determina a prioridade do i -ésimo vértice a ser considerado pelo AG para ser testada a sua inserção na rota correspondente ao sub-cromossoma a que esse gene pertence. O alelo i identifica a prioridade do i -ésimo vértice.

O AG para o GATOP-1 inicia o seu processo evolutivo com a geração da população inicial, a qual é feita de uma forma aleatória, isto é, são gerados números aleatórios pelo computador que irão preencher os valores contidos nos alelos dos genes de cada sub-cromossoma de cada indivíduo da população. O conceito neste AG é que cada sub-cromossoma codifica uma lista de prioridade que é atribuída a um veículo, portanto, para cada indivíduo ou cromossoma existem m listas e prioridade atribuídas a m veículos. Cada lista de prioridade consiste numa sequência de números que indicam a ordem pela qual os vértices devem ser testados para inserção na rota do veículo associado a essa mesma lista de prioridade. De modo a descodificar essas listas de prioridades a partir dos sub-cromossomas, um algoritmo construtivo é aplicado, seguindo regras específicas e respeitando as restrições do TOP.

A Figura 24 apresenta um grafo com 6 vértices e mais dois extras: um ponto inicial (I) e um final (F). Considera-se a existência de dois veículos. Também se encontra representado um cromossoma constituído por dois sub-cromossomas. O algoritmo construtivo (AC) descodifica a informação genética contida nos sub-cromossomas, e as listas de prioridade resultam da ordenação dos genes de acordo com o nível de prioridade de cada um. Após esse passo, o AC procede com a construção das rotas a partir das listas e assenta num processamento sequencial, ou seja, primeiro determina-se a rota para o veículo 1, depois a rota para o veículo 2,

e daí em diante até ao último veículo. Cada vértice é testado para ser adicionado no final da rota parcialmente construída. Se o vértice não couber, ou seja, se a duração máxima da rota é excedida, avança-se para o próximo vértice na lista e testa-se a sua inserção. Os vértices que não couberem na primeira rota serão testados para inserção na segunda rota, e assim por diante até à última rota.

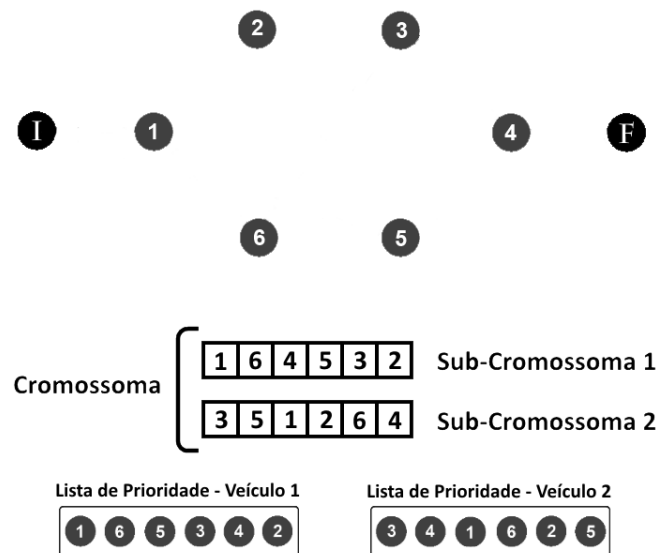


Figura 24 – Uma instância do TOP representada por um grafo de 8 vértices, com representação de um cromossoma e listas de prioridade para dois veículos.

Uma representação gráfica de uma solução viável para a instância da Figura 24 está apresentada na Figura 25. A rota do veículo 1 corresponde à linha sólida, e a do veículo 2 à linha a tracejado. As duas rotas são construídas considerando as listas de prioridades seguindo o esquema de processamento sequencial.

- Rota 1 (veículo 1): A rota contém os vértices 1-6-5, e esses vértices tornam-se automaticamente indisponíveis para o veículo 2. Assume-se que os vértices 2, 3 e 4 não estão incluídos no percurso, porque o limite de tempo seria excedido.
- Rota 2 (veículo 2) - Três vértices da lista de prioridades do veículo 2 foram incluídos na rota do veículo 1. O próximo vértice disponível é o vértice 3, que é adicionado à rota 2, seguido pelo vértice 4, com o qual a solução fica completa, pois a adição do vértice 2 violaria a restrição de tempo.

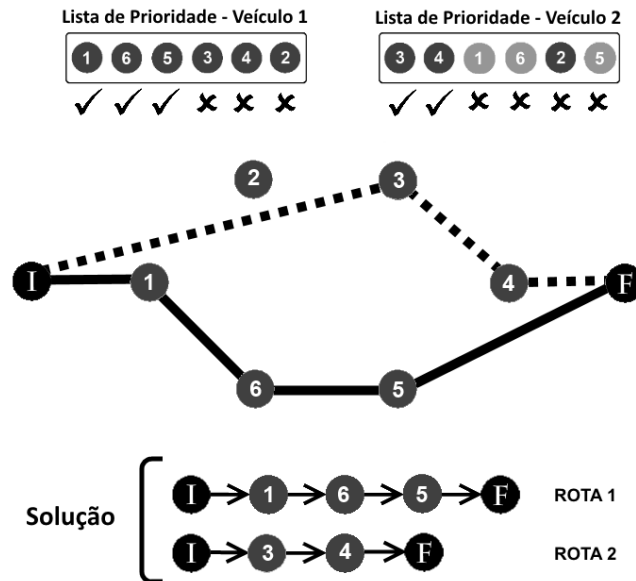


Figura 25 - Exemplo de uma solução possível para uma instância do TOP com base nas listas de prioridade de dois veículos.

No AG para o GATOP-1 introduziu-se uma componente adicional no processo evolutivo: um grupo especial denominado elite, que possui um número fixo de indivíduos aos quais são aplicados regras especiais. A utilização de grupos elite nos algoritmos genéticos é uma prática que toma o nome de elitismo. O elitismo é uma variante do processo geral de geração de uma nova população na qual é permitido que um grupo de indivíduos de uma população atual seja replicado para a nova população sem sofrer alterações no seu código genético. Esta estratégia é denominada seleção elitista, e garante que a qualidade de soluções do AG não decresce de uma geração para a seguinte.

O AG implementado na ferramenta GATOP-1 segue um processo evolutivo com seleção elitista simples, os indivíduos selecionados como elite são os que possuem os níveis de aptidão mais elevados em toda a população. O processo evolutivo do AG é apresentado no Algoritmo 1, onde P é a população de indivíduos (soluções), E é um subconjunto de P que inclui as soluções de elite (os elementos com maior aptidão) que permanecem imunes aos processos de recombinação e mutação; ΔP representa uma parte residual de P , que inclui n indivíduos gerados aleatoriamente, utilizados para promover a diversificação no processo reprodutivo, e para evitar o início de convergência para soluções ótimas locais; M designa o grupo de soluções seleccionadas de P que irão ser mutadas; C é o subconjunto de soluções de P seleccionadas para produzir a descendência O por meio de cruzamento. Após se realizar todas as operações genéticas de cruzamento e mutação, a população final é constituída por O , M , ΔP e E .

Normalmente a população de indivíduos tem uma dimensão máxima (*tamanhoPop*), ou seja, a cada geração, a população é constituída por um número constante de indivíduos. Deste modo, no final do ciclo geracional, ocorrer uma ação de “seleção natural”, em que os indivíduos com menor nível de aptidão que não têm lugar na população são excluídos (descartados).

Algoritmo 1: Algoritmo Genético para GATOP-1

```

1.  Início
2.     $P \leftarrow \text{Inicializa\_População}(tamanhoPop)$ 
3.    iteração = 1;
4.    enquanto iteração  $\leq$  maxIterações fazer:
5.       $E \leftarrow \text{Seleciona\_Elite}(P)$ ;
6.       $\Delta P \leftarrow \text{Geração\_Aleatória}(n)$ ;
7.       $M \leftarrow \text{Seleciona\_Muta\c{c}\~{a}o}(P)$ ;
8.       $M \leftarrow \text{Muta\c{c}\~{a}o}(M)$ ;
9.       $C \leftarrow \text{Seleciona\_Cruzamento}(P)$ ;
10.      $O \leftarrow \text{Cruzamento}(C)$ ;
11.      $P_{temp} \leftarrow P + O + M + \Delta P + E$ ;
12.     Avalia_Aptid\~{a}o( $P_{temp}$ );
13.      $P \leftarrow \text{Seleciona}(P_{temp})$ ;
14.     itera\c{c}\~{a}o  $\leftarrow$  itera\c{c}\~{a}o +1;
15.
16.  Fim

```

Conceptualmente espera-se que na operação de cruzamento, dois cromossomas (soluções) de boa qualidade sejam combinados a fim de se obter um cromossoma (solução) de melhor qualidade que os seus progenitores. Para realizar este procedimento no GATOP-1, um bloco de genes consecutivos é copiado de uma solução progenitora e é colocada numa posição aleatória no interior da outra solução progenitora. O bloco de genes tem um tamanho variável que é determinado de forma aleatória. A posição de inserção varia aleatoriamente. Depois da inserção, os vértices que aparecem duas vezes na solução descendente são, em seguida, removidos. O esquema da Figura 26 mostra como o processo de cruzamento é feito. Neste exemplo, a passagem ocorre entre duas soluções, A e B, com duas rotas cada. Em primeiro lugar, a solução descendente é gerada como uma cópia da solução progenitora A. Depois, um conjunto de vértices consecutivos é copiado de uma das rotas da solução B e é inserido numa das rotas da solução descendente, escolhida aleatoriamente e numa posição arbitrária. Posteriormente ocorre a remoção dos vértices repetidos na rota mas sem afetar os vértices recentemente adicionados. Em seguida ocorre a validação da solução, onde se verifica se os novos vértices adicionados a uma rota não fazem parte de outra rota da mesma solução, e se não, então o processo de

cruzamento termina. Caso a rota não seja válida, ocorre um processo de correção para a tornar válida. Por fim, a nova solução gerada está pronta para competir por uma vaga na próxima geração (população). As soluções A e B não são descartadas imediatamente após o cruzamento entre elas, pois poderão ser usadas em outros cruzamentos e outras operações genéticas durante o mesmo ciclo reprodutivo ou geração.

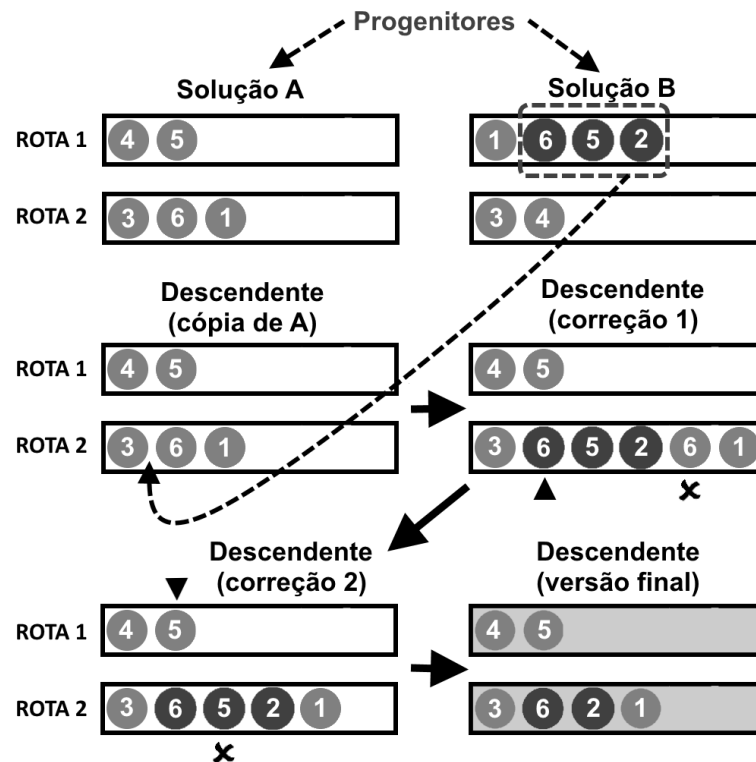


Figura 26 - Exemplo de funcionamento da operação de cruzamento.

Para além da operação de cruzamento, existe no AG um outro operador genético: a mutação. Na mutação, uma solução válida pode alterar o seu próprio código genético. Neste caso, decidiu-se realizar uma troca simples de posição, em que primeiro se seleciona de forma aleatória um vértice de uma das rotas da solução, o qual troca de posição com o vértice imediatamente a seguir, na mesma rota. Um exemplo que mostra como o processo funciona pode ser observado na Figura 27.

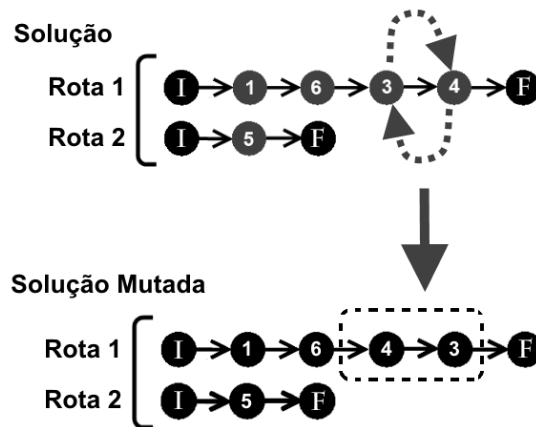


Figura 27 - Exemplo de funcionamento da mutação.

Os indivíduos são selecionados para reprodução via cruzamento e mutação de acordo com uma regra simples, em que quanto maior for o nível de aptidão de um indivíduo, maior é a sua probabilidade de tomar parte no processo de reprodução. Neste AG, existem parâmetros que definem o número de mutações e cruzamentos que podem ocorrer durante cada fase de reprodução (geração). Outros parâmetros da ferramenta GATOP-1 permitem ajustar o número de indivíduos imunes (elite), bem como a alteração do número de indivíduos gerados aleatoriamente em cada nova iteração. Também é possível ajustar o algoritmo para aceitar apenas cruzamentos e/ou mutações que melhoram a população de soluções. No caso de apenas aceitar cruzamentos melhores, o descendente de dois indivíduos (soluções) é medido em termos de aptidão, e caso seja mais apto que um de seus progenitores, então o novo indivíduos é mantido, caso contrário, ele é descartado. Todos os parâmetros anteriormente mencionados vão determinar a eficiência do algoritmo, bem como a sua eficácia global.

A aplicação de *software* JAVA desenvolvida para implementar a ferramenta GATOP-1 possui uma interface gráfica do utilizador simples mas funcional, com um conjunto de opções que permite o ajuste de vários parâmetros do AG para ajudar a obter melhores resultados num problema ou instância específica do TOP. O *software* desenvolvido pode carregar dados de diferentes instâncias em formato de ficheiro de texto (".txt"), e é possível definir a condição de paragem de duas formas: 1) máximo número de gerações; e 2) valor mínimo de aptidão de indivíduo ou qualidade de solução atingido. Há também um elemento de visualização (*Solution Viewer*), que apresenta em tempo real a representação gráfica das rotas da melhor solução encontrada até ao momento. Sempre que é calculada uma melhor solução, as rotas apresentadas são atualizadas. Na Figura 28 apresenta-se o *Solution Viewer*, onde os círculos

correspondem aos vértices de uma instância do TOP. Os vértices apresentam um diâmetro proporcional ao seu valor de prêmio, isto é, o valor de alelo do gene correspondente.

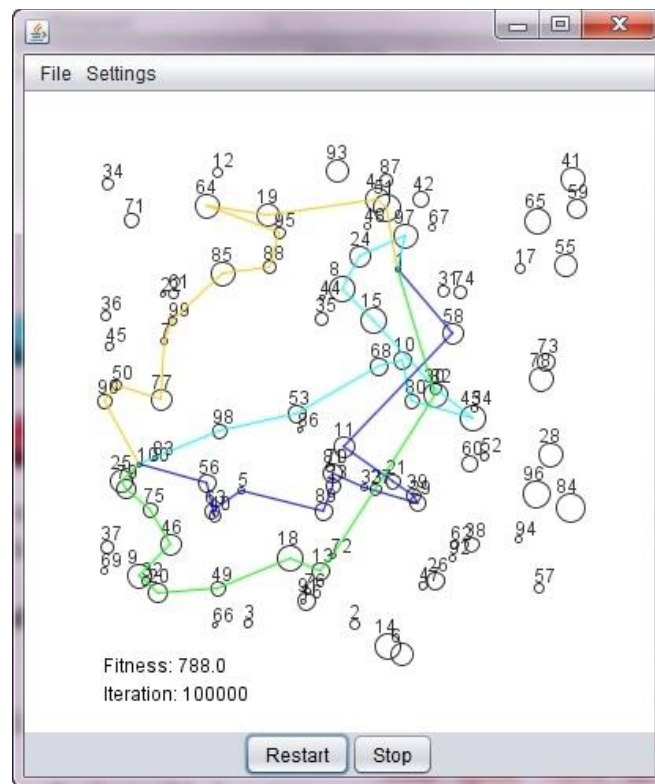


Figura 28 - Solution Viewer da ferramenta GATOP-1.

5.3.1.2 Algoritmo GATOP-2

O algoritmo desenvolvido para a ferramenta GATOP-2 difere da abordagem anteriormente apresentada (GATOP-1), principalmente no processo de descodificação de soluções (construção de rotas), e nos operadores genéticos de cruzamento e mutação. Existem também algumas diferenças em relação à hierarquia de cromossomas na população, uma vez que dois grupos elite são considerados no GATOP-2 em vez de apenas um grupo elite utilizado no GATOP-1. Em termos de representação genética, um cromossoma consiste numa cadeia de genes única, não existindo o conceito de sub-cromossoma como sucede na ferramenta GATOP-1.

Tal como é esperado, no AG desenvolvido para o GATOP-2, uma solução válida deve conter uma rota para cada veículo disponível, e cada rota inclui uma sequência de vértices a serem visitados num determinado limite de tempo. O funcionamento AG do GATOP-2 pode ser abreviadamente descrito no Algoritmo 2, onde *Pop* representa a população com *N* indivíduos; *E*

designa o grupo elite; SE corresponde ao grupo sub-elite; PA e PB são respetivamente a lista A e B de progenitores; e D denota o grupo com todos os descendentes.

Algoritmo 2: Algoritmo Genético para GATOP-2

```

1.  Início
2.   $Pop \leftarrow$  Inicializa_População( $N$ )
3.  iteração = 1;
4.  enquanto iteração  $\leq$  maxIterações fazer:
5.  |   Avalia_Aptidão( $Pop$ );
6.  |    $E \leftarrow$  Selecciona_Elite ( $Pop$ );
7.  |    $SE \leftarrow$  Selecciona_SubElite ( $Pop$ );
8.  |    $PA \leftarrow$  Selecciona_ProgenitoresListaA ( $Pop$ );
9.  |    $PB \leftarrow$  Selecciona_ProgenitoresListaB ( $Pop$ );
10. |    $D \leftarrow$  Cruzamento ( $PA, PB$ );
11. |   Pop.Remove( $PA$ );
12. |   Pop.Remove( $PB$ );
13. |    $D \leftarrow$  Mutação ( $D$ );
14. |    $SE \leftarrow$  Mutação ( $SE$ );
15. |    $Pop \leftarrow D + SE + E$ ;
16. |   iteração  $\leftarrow$  iteração +1;
17. |
18. Fim

```

A fim de produzir soluções para o TOP, o algoritmo do GATOP-2 começa por criar uma população inicial com indivíduos gerados de forma aleatória, isto é, com código genético gerado a partir de números aleatórios que satisfazem um critério de aceitação. Em seguida, os operadores genéticos de cruzamento e mutação são aplicados à população, a fim de promover a sua evolução para melhores níveis de aptidão. Este processo é repetido até que um critério de paragem seja encontrado, seja por se atingir um número máximo de iterações do algoritmo (gerações) ou por se obter um determinado valor de aptidão de indivíduo (solução). A fim de se criar uma rota válida, os vértices são adicionados a partir de uma lista de disponibilidade, que é comum a todas as rotas que serão determinadas a partir de um determinado cromossoma. A lista de disponibilidade contém os genes do cromossoma ordenados segundo o valor dos alelos, do maior para o menor, ou seja, do vértice mais prioritário para o menos prioritário. A tentativa de adicionar um vértice numa rota só é bem-sucedida se a adição não exceder o tempo disponível, isto é, a duração máxima da rota. Uma vez adicionado a um percurso, o vértice é removido da lista e assinalado como visitado. Um cromossoma deve gerar tantas rotas quanto o número de veículos disponíveis. Na Figura 29 mostra-se um esquema simples para representar o modo como um vértice é adicionado a uma rota. O algoritmo construtivo (AC) usa

processamento semi-paralelo para a criação das rotas, isto é, quando um vértice não pode ser adicionado a uma rota, tenta-se a sua adição na rota seguinte, até se esgotar todas as possibilidades. Cada vértice da lista é testado para inserção na última posição, imediatamente antes do último vértice (destino). No entanto, cada um dos vértices da lista é sempre inicialmente testado para inserção na primeira rota da solução, e apenas se o vértice não for adicionado à rota é que é testado na seguinte. Deste modo as rotas vão sendo construídas em paralelo, mas existe uma maior incidência na construção das primeiras rotas, nas quais se testam em primeiro lugar os vértices disponíveis. Este mecanismo do AC para o GATOP-2 difere do AC do GATOP-1, pois este último conclui sempre a primeira rota antes de atribuir vértices à segunda rota, que por sua vez é “fechada” antes de iniciar a seguinte, e assim sucessivamente.

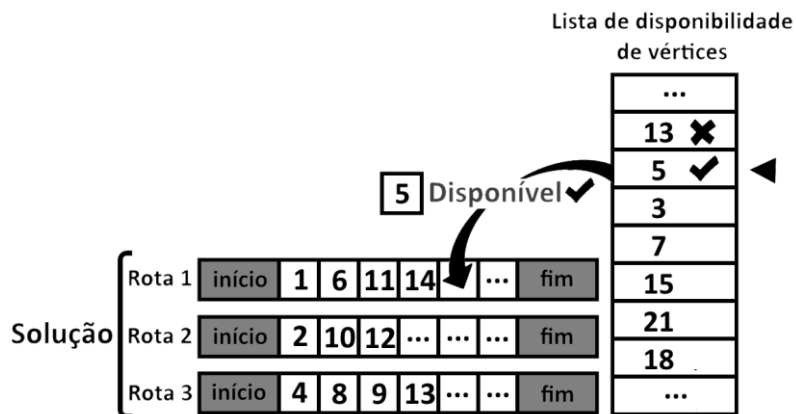


Figura 29 - Exemplo de inserção de vértice numa rota da solução.

No que diz respeito ao processo evolutivo, este centra-se nas operações genéticas de cruzamento e mutação. Cada cromossoma decodificado corresponde a uma solução, que consiste numa lista de rotas. O processo de cruzamento é realizado através da troca de rotas inteiras e consecutivas entre dois cromossomas progenitores decodificados (soluções), resultando na criação de duas novas soluções descendentes (ver Figura 30). O número de rotas que são trocadas é determinado de forma aleatória, e um bloco inteiro de rotas consecutivas é copiado de uma solução para outra, tal como pode ser observado na Figura 30. A posição na lista de rotas das duas soluções a partir da qual é feita a troca de rotas, é determinada aleatoriamente. Este processo de cruzamento assemelha-se ao conceito da técnica denominada *one-point crossover*, em que em ambos os cromossomas dos progenitores marca uma posição, igual para ambos, a partir da qual os valores dos alelos são trocados diretamente entre eles, resultando em dois cromossomas descendentes. Se as rotas trocadas possuem vértices comuns com as rotas que não foram removidas em cada solução descendente, então ocorre um processo de

correção das soluções, sendo removidos das rotas adicionadas os vértices comuns, tornando assim a solução válida.

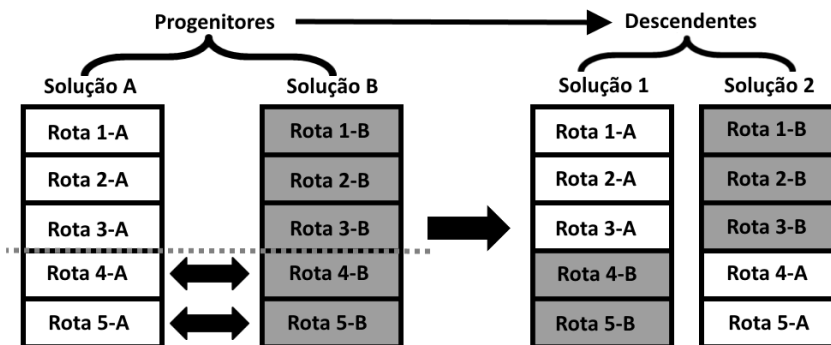


Figura 30 - O processo de cruzamento entre duas soluções (cromossomas decodificados).

Os cromossomas (soluções) utilizados para cruzamento são escolhidos com base na seleção por roda de roleta (*roulette wheel*), também conhecida como a seleção proporcional à aptidão, que avalia a probabilidade de um cromossoma ser selecionado para cruzamentos. Quanto maior o nível de aptidão de um cromossoma, maior a probabilidade de ser escolhido como um progenitor para a próxima geração. O número de cromossomas selecionados é sempre um número par, que é igual ao dobro do número de cruzamentos que se efetuam em cada ciclo de evolução. Esses cromossomas progenitores são distribuídos em duas listas de progenitores, A e B, em que um progenitor da lista A só se cruza com apenas um progenitor da lista B e vice-versa.

Na Equação (30), a probabilidade de um cromossoma i ser selecionado é indicada como p_i . O nível de aptidão f (*fitness*) desse cromossoma i é f_i , e consequentemente f_k corresponde ao nível de aptidão de um cromossoma k . A variável N corresponde ao tamanho da população, ou seja, o número total de indivíduos que a constituem.

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^N f_k} \quad (30)$$

Relativamente à outra operação genética utilizada, a mutação, esta consiste na remoção de um vértice de uma rota escolhida aleatoriamente de uma solução (cromossoma decodificado). Em seguida, é feita uma tentativa para inserir um ou mais vértices da lista de disponibilidade do cromossoma (vértices que não foram visitados na solução). Os vértices dessa lista são verificados um a um, em ordem aleatória, e quando um vértice corrente representar uma opção válida, este é adicionado à rota. Este processo foca-se na tentativa de adicionar novos vértices, tantos quantos for possível. Na Figura 31 é apresentado um esquema simples que representa o

processo de mutação, em que apenas um vértice é removido de um percurso. A este tipo de mutação atribuiu-se o nome de *single-swap*. Há também a possibilidade de realizar mutações mais complexas através da remoção de mais do que um vértice a partir de uma rota, obtendo-se assim uma mutação do tipo *multi-swap*, e o processo é executado de a maneira semelhante à mutação *single-swap*. A mutação *multi-swap* é ativada escolhendo essa opção na ferramenta GATOP-2.

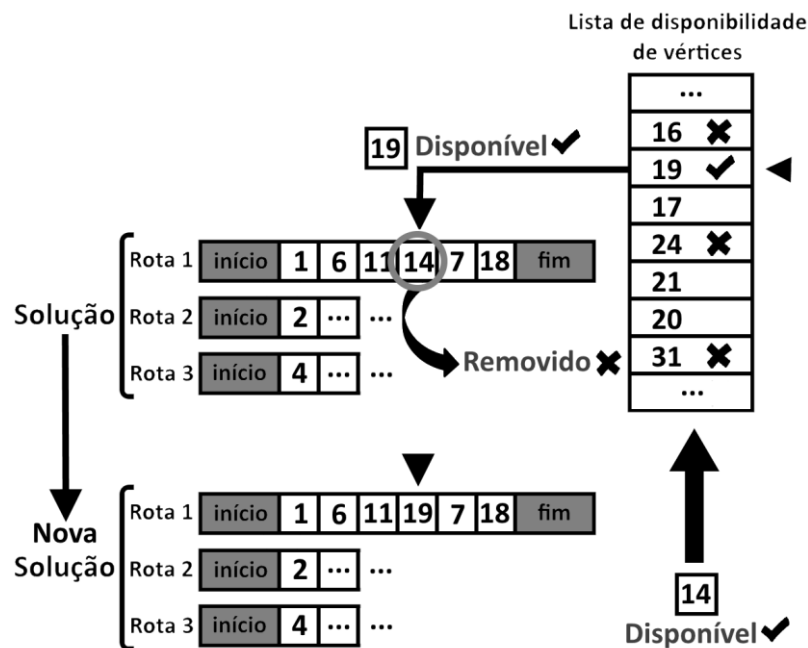


Figura 31 - Processo de mutação do tipo *single-swap* de uma solução (cromossoma decodificado).

Em termos hierárquicos da população de indivíduos (ou soluções) existem duas classes especiais: a elite e a sub-elite. A estas classes são aplicadas regras diferentes em relação aos restantes indivíduos da população. A classe de elite é o grupo dos cromossomas mais aptos dentro da população de uma certa geração, isto é, são os cromossomas que apresentam os melhores valores da função de aptidão. Os cromossomas desta classe são imunes à mutação, e passam diretamente para a população seguinte sem sofrer alterações genéticas. Quanto à classe sub-elite, esta inclui os cromossomas mais aptos imediatamente após a elite. Este grupo transita completamente para a população seguinte, mas os seus elementos já são passíveis de sofrer mutações. Durante o processo evolutivo, os cromossomas (soluções) resultantes de ambos os processos de mutação e cruzamento são mantidos, mesmo que tenham menor nível de aptidão que os cromossomas que os originaram. Antes do fim de cada ciclo geracional ocorre a fase de substituição, e aí, se a população é composta por N indivíduos, então, apenas os N indivíduos mais aptos irão constituir a nova população, sendo os restantes descartados.

A ferramenta GATOP-2 foi implementada utilizando a linguagem de programação JAVA, e resultou numa aplicação que incorpora uma interface gráfica de utilizador (IGU) criada com a *framework* Java Swing, a qual é apresentada na Figura 32. A IGU permite o ajuste dos seguintes parâmetros: cromossoma, tamanho da população, e a intensidade de mutação (quantidade de genes mutados por cromossoma, ou número de vértices trocados por rota-solução). Também é possível definir o número de indivíduos/cromossomas nos grupos de elite e sub-elite. Há possibilidade de carregar diferentes instâncias do TOP, desde que os dados estejam devidamente formatados num ficheiro de texto do tipo “.txt”. A IGU apresenta no painel do lado esquerdo a atual população de cromossomas, enquanto no da direita é apresentada a melhor solução produzida em cada geração.

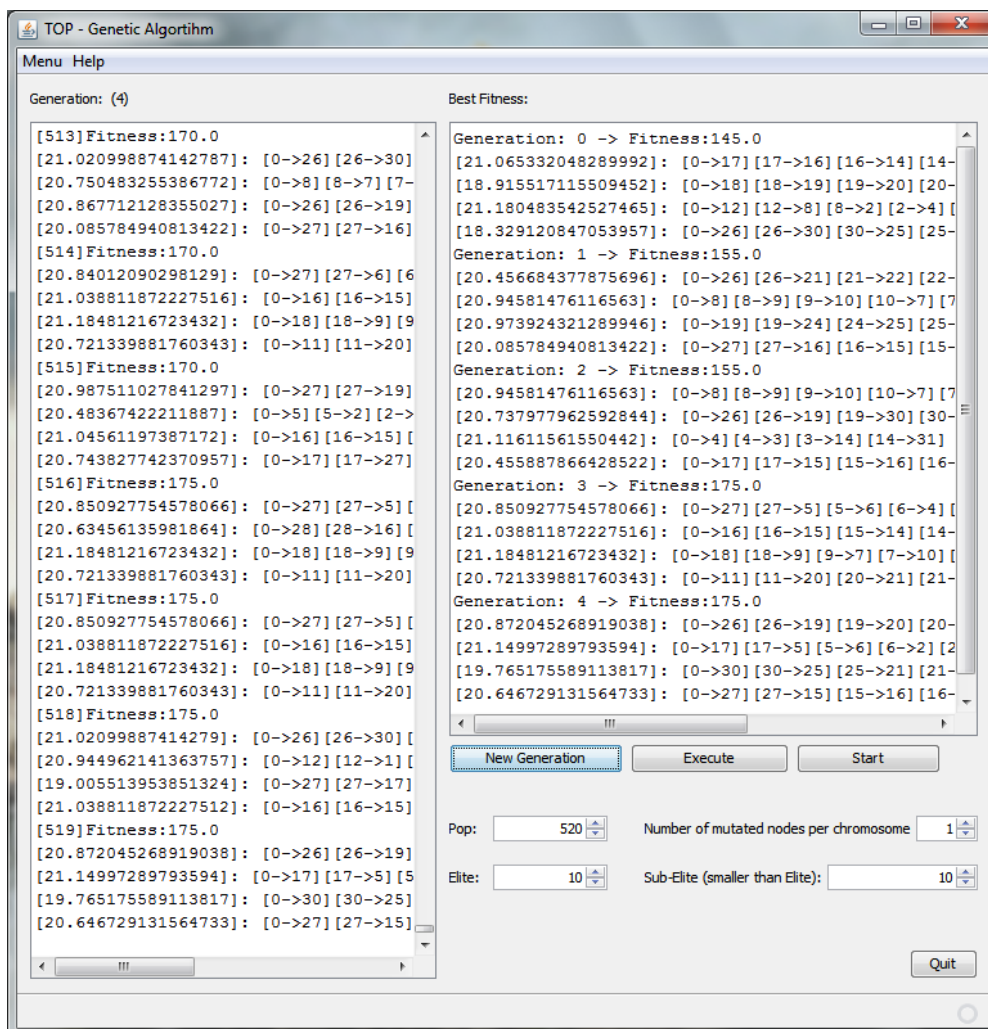


Figura 32 – Pormenor da interface gráfica do utilizador da ferramenta GATOP-2.

5.3.1.3 Algoritmo GATOP-3

A ferramenta GATOP-3 foi desenvolvida usando a linguagem de programação JAVA e a plataforma JCELL. O processo evolutivo no AG é do tipo geracional, à semelhança do que ocorre nos algoritmos das ferramentas GATOP-1 e GATOP-2. Nos algoritmos genéticos geracionais a população é do tipo não-estruturada, e portanto cada indivíduo pode interagir com quaisquer outros indivíduos da população, isto é, pode efetuar cruzamentos ou outras operações genéticas que envolvam quaisquer outros indivíduos [33].

O funcionamento do AG desenvolvido para o GATOP-3 pode ser resumido no pseudo-código que consta no Algoritmo 3, onde existe um conjunto de operações que se repetem a cada iteração do algoritmo, num ciclo que se repete tantas vezes quanto o número de indivíduos na população. Em cada execução desse ciclo ocorre a seleção de dois progenitores e o cruzamento entre eles que resulta num descendente, cujos genes podem sofrer mutação, ou seja, alteração do valor dos respectivos alelos, de acordo com uma função de probabilidade.

Algoritmo 3: Algoritmo Genético para GATOP-3

```
1.  Início
2.  Pop ← Inicializar_População(N);
3.  Avaliar_Aptidão(Pop);
4.  iteração ← 1;
5.  enquanto iteração ≤ maxIterações fazer:
6.  |   de i←1 até i←N fazer:
7.  |   |   Pop_auxiliar ← Pop;
8.  |   |   progenitores ← Selecionar_Progenitores(Pop);
9.  |   |   descendente ← Cruzamento(progenitores);
10. |   |   k ← 0;
11. |   |   enquanto k < descendente.tamanho fazer:
12. |   |   |   se valorAleatório ≤ probabilidadeMutação então;
13. |   |   |   |   Mutação(descendente.alelo(k));
14. |   |   |   └──┘
15. |   |   Avaliar_Aptidão(descendente);
16. |   |   Substituir(Pop_auxiliar, descendente);
17. |   |   └──┘
18. |   |   Pop ← Pop_auxiliar;
19. |   |   iteração ← iteração +1;
20. |   └──┘
21. Fim
```

Para determinar o nível de aptidão de um indivíduo, o algoritmo construtivo (AC) descodifica a solução a partir do cromossoma de um indivíduo, executando o processo de construção das

rotas. A função de aptidão contabiliza o total de prémios obtidos em cada rota e a soma total perfaz o nível de aptidão do indivíduo, que por sua vez denota ao nível de qualidade da solução que este codifica.

Na etapa de substituição, cada indivíduo descendente pode substituir um dos seus progenitores seguindo uma de três políticas possíveis: 1) substitui se o nível de aptidão do descendente for igual ou superior ao de um dos progenitores; 2) substitui se o nível de aptidão do descendente é superior ao de um dos progenitores; e 3) substitui sempre. A política de substituição escolhida foi a primeira, pois é uma opção de compromisso entre as outras duas.

No AG desenvolvido para a ferramenta GATOP-3 considera-se um grafo com n vértices para representar uma instância do TOP. Estabeleceu-se que um cromossoma é composto por N genes, cujo valor é igual a $n - 2$. Cada gene no cromossoma está associado a um vértice no grafo, exceptuando os vértices inicial e final. A cada gene está associado um alelo que contém um valor que traduz o nível de prioridade de um vértice em ser considerado para inclusão numa das rotas da solução. Neste caso, quanto mais baixo for o valor do alelo, mais prioritário é o vértice associado ao respetivo gene. Na Figura 33 está presente uma representação possível de um cromossoma no AG para o problema TOP com base no referido esquema de prioridades, cujos valores se encontram nos alelos.

GENES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ALELOS	4	1	11	5	10	2	6	13	7	3	8	12	9

Figura 33 – Exemplo de representação de um cromossoma no AG para o problema TOP seguindo um esquema de prioridades.

O AC gera rotas através da interpretação dos cromossomas, respeitando sempre as restrições impostas pelo problema do TOP. No TOP, uma restrição importante é a duração máxima de cada rota. De modo a construir uma rota, os vértices são adicionados a partir de uma lista de prioridades, onde constam todos os índices dos vértices, ordenados de acordo com os respetivos níveis de prioridade (valores dos alelos), do mais prioritário para o menos prioritário. Na Figura 34 consta a lista de prioridades do cromossoma apresentado na Figura 33.

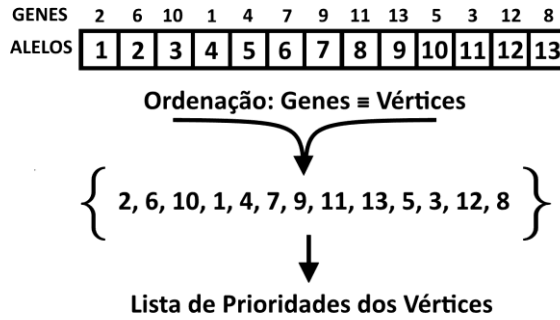


Figura 34 - Exemplo de lista ordenada de vértices do mais prioritário para o menos prioritário.

A tentativa de adicionar um determinado vértice a uma rota só é bem-sucedida se a adição do vértice mantém a rota válida em termos de restrições impostas, nomeadamente a duração máxima estabelecida para as rotas. Uma vez adicionado a uma rota, um vértice é removido da lista de disponibilidade e é marcado como parte da solução. Desta forma garante-se que é cumprida a restrição que impõe que um vértice só pode ser visitado uma vez e por um só veículo. Todos os vértices na lista são testados para inserção em cada uma das rotas que constituem a solução. Nesta abordagem, determinou-se que um cromossoma deve sempre traduzir uma solução com tantas rotas quanto o número de os veículos disponíveis para resolver uma dada instância do TOP. Na Figura 35 é apresentado um esquema em que se visualiza o processo de construção de três rotas no momento em que ocorre a tentativa de inserção do vértice 13 na terceira rota de uma solução.

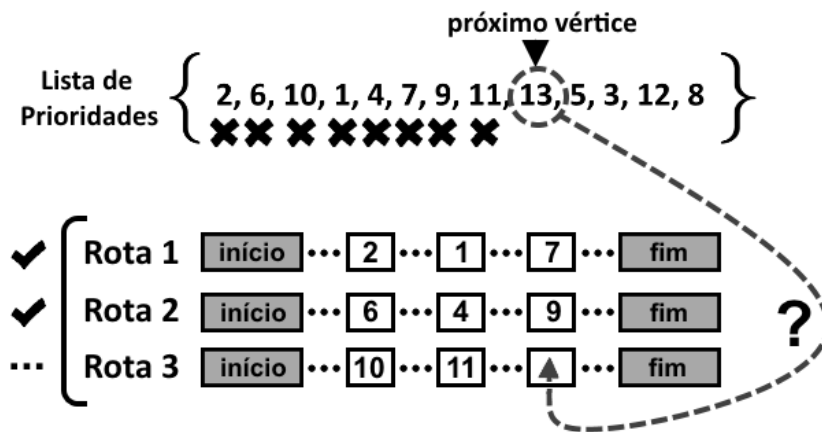


Figura 35 - Processo de construção de rotas no algoritmo genético da ferramenta GATOP-3.

De modo a decodificar a solução contida em cada cromossoma, o AC da ferramenta GATOP-3 executa um processamento das rotas em paralelo. O mecanismo consiste em testar a inserção de cada vértice em cada uma das rotas e em todas as posições possíveis de cada rota, tendo em vista encontrar a melhor inserção possível, isto é, identificar a opção que representa menor

“custo” de inserção. Tal sucede quando um vértice é colocado numa posição de uma certa rota onde aumenta menos a distância ou duração total da rota. Um vértice fica definitivamente incluído na rota onde o custo que implica a sua visita é menor, comparando com as restantes rotas da solução. Após um vértice ser adicionado a uma rota, o próximo vértice na lista de prioridade é testado para inserção nas diversas rotas que constituem a solução. O fluxograma da Figura 36 demonstra o funcionamento desta estratégia de inserção de vértices nas rotas.

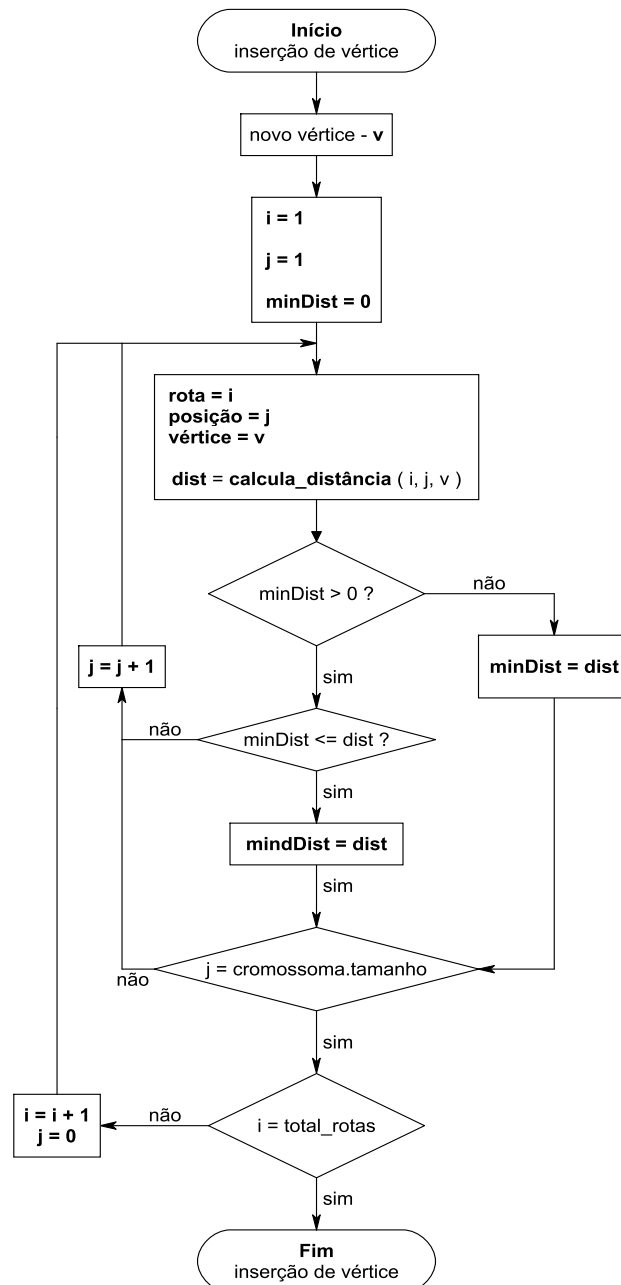


Figura 36 - Algoritmo construtivo: processo de inserção de vértices em rotas.

Um exemplo de uma possível solução válida segundo o AG do GATOP-3 no contexto da recolha de RED é apresentada na Figura 37. Na figura estão representados quinze vértices,

sendo que treze deles estão numerados e correspondem a pontos de recolha, e os restantes dois vértices identificados com i e f , representam respetivamente o ponto de partida (início) e o de chegada (fim) para os veículos. A solução consiste em duas rotas para atribuição a dois veículos. Cada ponto de recolha (ou vértice) tem um número de pontos de prioridade (PP) associado. O valor de PP de um vértice não está relacionado com o valor no alelo do gene que lhe corresponde, mas funciona como um valor de prémio no modelo do TOP. São dois valores distintos que têm propósitos diferentes no processo de descodificação de um cromossoma. A soma de todos os PP obtidos nas rotas de uma solução corresponde ao valor de aptidão do cromossoma que codifica essa solução. Neste exemplo, nem todos os vértices estão incluídos nas rotas devido à existência do limite de duração destas.

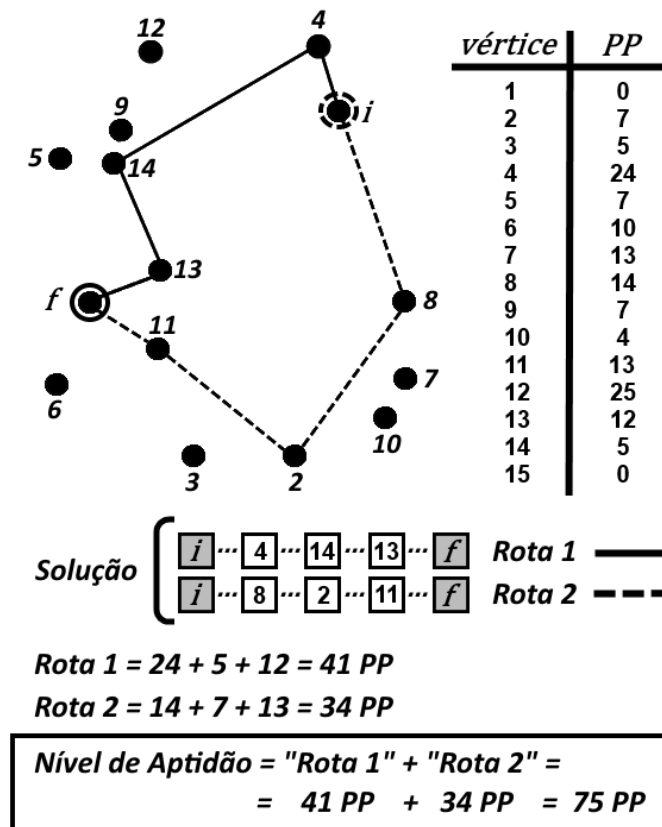


Figura 37 - Exemplo de uma possível solução do AG para o TOP numa instância com 15 vértices.

Relativamente ao processo de evolução dos indivíduos (cromossomas), ocorrem duas operações genéticas: cruzamento e mutação. Como vantagem principal do AG refere-se a atuação dos operadores genéticos sobre a representação e não sobre as soluções diretamente, como sucede nos algoritmos das ferramentas GATOP-1 e GATOP-2.

Em relação às técnicas adotadas para o cruzamento no AG do GATOP-3, a escolha resultou em duas opções: *distance-preserving crossover* (DPX), e *cycle crossover* (CX). A plataforma

JCELL inclui implementações de outras técnicas de cruzamento, contudo, após a execução de testes com 30 instâncias do TOP, as técnicas que alcançaram melhor desempenho foram o cruzamentos DPX e CX, com ligeira vantagem para o DPX.

Na técnica de cruzamento DPX, sempre que ambos os progenitores possuem o mesmo valor de alelo num determinado gene i , esse valor de alelo é copiado para o i -ésimo gene do descendente. Os restantes alelos nos genes do descendente são preenchidos de forma aleatória com os valores de alelo que ainda não foram atribuídos ao descendente, contudo esses valores de alelo devem estar presentes nos alelos de ambos os progenitores. Por exemplo, se algum dos progenitores não possuir o valor x de alelo para algum dos genes, então o descendente não pode incluir no seu cromossoma o valor x no alelo de algum gene. O esquema na Figura 38 apresenta o funcionamento da técnica de cruzamento DPX.

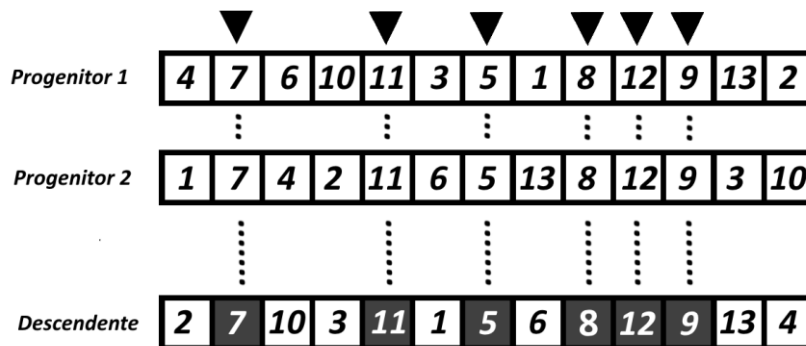


Figura 38 - Funcionamento da técnica de cruzamento DPX.

Os indivíduos usados nas operações de cruzamento são escolhidos de entre a população de indivíduos de acordo com as seguintes regras: 1) o primeiro progenitor selecionado usando o método de seleção central; 2) o segundo progenitor é selecionado segundo um sistema de torneio. Na seleção central, um indivíduo é selecionado para progenitor se se encontrar na posição central numa lista não-ordenada que inclui os indivíduos da população, isto é, se está numa posição que está à mesma distância da primeira e da última posição da lista. Na seleção de progenitor via sistema de torneio ocorre uma série de “duelos” ocorrem entre indivíduos, e em cada duelo o vencedor é sempre o que tem maior nível de aptidão, que no caso do TOP e da recolha de RED corresponde ao total de PP que a solução codificada em cada indivíduo no seu respetivo cromossoma. São executados vários torneios, e os vencedores de cada um tornam-se progenitores da geração seguinte.

A outra operação genética que é usada no AG é a mutação, que é um procedimento onde ocorre alteração do código genético de um cromossoma. Esta operação consiste em modificar o

valor de um ou mais alelos selecionados de um cromossoma com base numa função de probabilidade. Para cada gene do cromossoma é testada a possibilidade de ocorrer mutação através da geração de um número aleatório, que quando tem um valor igual ou inferior a um determinado valor fixo previamente escolhido, o valor do alelo é alterado para um número aleatoriamente escolhido entre 1 e o total de vértices do problema que se estiver a resolver (p.ex. o TOP), alterando deste modo a prioridade do vértice em ser adicionado às rotas.

Variantes da ferramenta GATOP-3

A ferramenta GATOP-3 foi expandida de modo a poder resolver outros problemas derivados do TOP. Um total de nove variantes da ferramenta GATOP-3 foram desenvolvidas com recurso à plataforma JCELL, e encontram-se listadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Variantes da ferramenta GATOP-3.

Ferramenta	Problema-alvo
genGA-TOP	TOP – Team Orienteering Problem
genGA -TOPTW	TOPTW – TOP with Time Windows
genGA -TOPdTW	TOPdTW – TOP with double Time Windows
genGA -CTOP	CTOP – Capacitated TOP
genGA -CTOPTW	CTOPTW – CTOP with Time Windows
genGA -CTOPdTW	CTOPdTW – CTOP with double Time Windows
genGA -CTOPdTW-HF	CTOPdTW with heterogeneous fleet – HF (frota heterogénea)
genGA -CTOPdTW-MPC	CTOPdTW multi-product collection - MPC (recolha multi-produto)
genGA -CTOPdTW-MPC-HF	CTOPdTW with MPC and HF

5.3.2 Algoritmos Genéticos Celulares

Na secção anterior foram apresentados algoritmos genéticos (AG) do tipo geracional. Além deste tipo de AG, existem outros que suscitaram interesse e foram também explorados. Esses AG são do tipo descentralizado, em que a população de indivíduos é estruturada, ao invés do que ocorre nos algoritmos genéticos geracionais [33]. Neste tipo de algoritmos descentralizados, um indivíduo só pode interagir (efetuar cruzamentos, etc.) com um subconjunto de indivíduos na população. Existem duas formas de estruturar a população que resultam em dois tipos de AG descentralizados:

- 1) Algoritmo Genético Distribuído: os indivíduos são distribuídos em subconjuntos independentes chamados ilhas que trocam alguma informação entre si durante a execução do algoritmo e evolução dos indivíduos;
- 2) Algoritmo Genético Celular: estabelece-se uma estratégia de isolamento por distância entre os indivíduos.

Nos algoritmos genéticos celulares (AGC), a população é normalmente estruturada numa rede de pontos toroidal 2-D, apresentada como uma grelha (ou grafo) com vértices conectados. A estrutura pode ser expandida para 3-D ou reduzida para 1-D. Em cada ponto na rede é colocado um indivíduo, e cada um interage apenas com outros que se encontram na sua vizinhança. A vizinhança de um indivíduo é definida em termos da distância Manhattan [58], desde o ponto em se encontra um indivíduo até outros indivíduos da população (Figura 39). A vizinhança de um indivíduo sobrepõe-se à vizinhança de outros indivíduos nas imediações (Figura 40). A existência de grupos (vizinhanças) que se sobrepõem uns aos outros permite que haja exploração e diversidade nas suas fronteiras, enquanto ocorre intensificação no interior de cada um através da ocorrência de operações genéticas como cruzamentos, recombinações e mutações, onde apenas tomam parte os indivíduos desse grupo ou vizinhança, havendo competição direta entre eles.

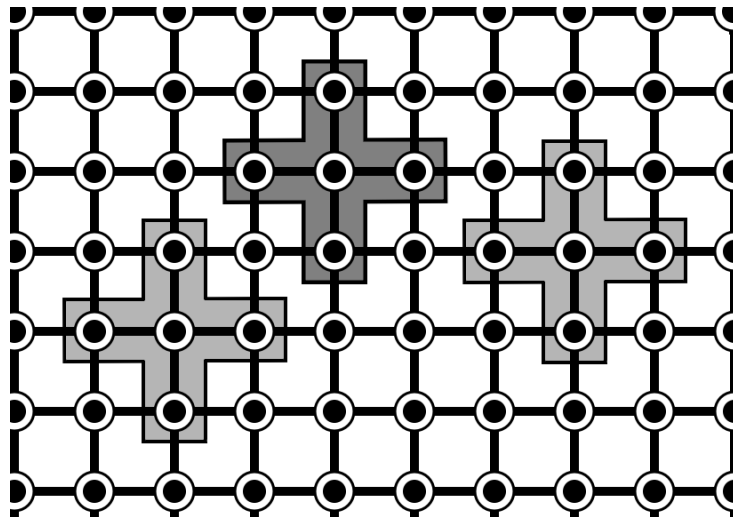


Figura 39 - Exemplos de vizinhanças na população estruturada para AGC em formato 2-D.

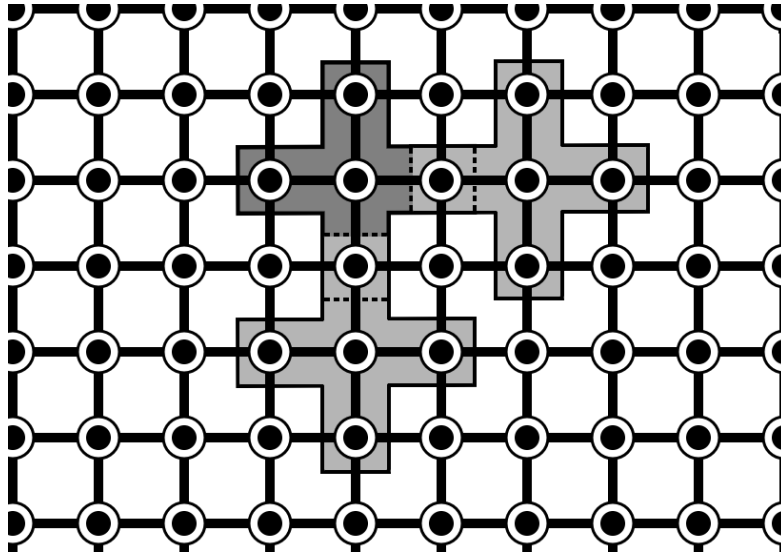


Figura 40 - Sobreposição de vizinhanças na população de um AGC.

Normalmente, todas as vizinhanças que se formam numa população têm tamanho e forma geométrica idêntica. As formas mais frequentemente usadas são as do tipo L5, também conhecidas como *Von Neumann* ou NEWS (North, East, West and South), e do tipo C9, denominadas também como vizinhança de Moore. As letras L e C designam o tipo Linear e Compacto respetivamente. Existem outros tipos de vizinhança, por exemplo em forma de diamante, sendo uma configuração comum a D13. Representações gráficas dos tipos de vizinhança mencionados, assim como outros, constam na Figura 41.

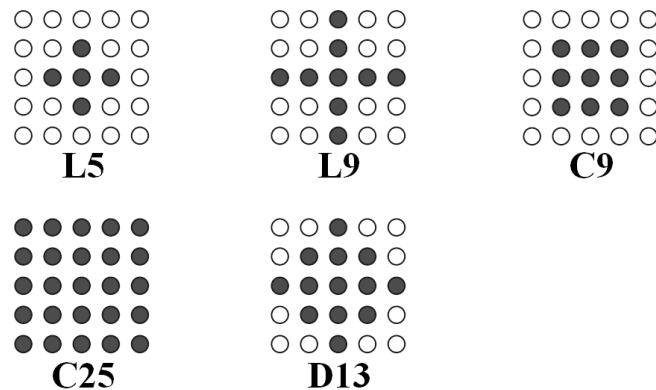


Figura 41 - Diferentes tipos de vizinhança num AGC.

No AGC, o ciclo evolutivo decorre no interior de uma vizinhança, e os indivíduos que a constituem apenas interagem entre si durante esse processo. A cada iteração do AGC executa-se o ciclo evolutivo numa vizinhança de cada vez. É durante o ciclo evolutivo que decorrem as operações genéticas como cruzamentos e mutações. Para se efetuar o cruzamento, dois progenitores são selecionados de entre os indivíduos da vizinhança, e obtém-se um descendente.

Este poderá sofrer mutações de acordo com uma probabilidade específica, e no final poderá substituir um certo indivíduo da vizinhança de acordo com uma das políticas de substituição referidas na descrição da ferramenta GATOP-3. A política escolhida foi a de substituir um certo indivíduo da vizinhança caso o descendente obtido com o cruzamento possua nível de aptidão igual ou superior a um dos seus progenitores.

Devido à população ser estruturada nos AGC, existe sobreposição de vizinhanças, e por isso um ponto na rede, ou indivíduo na população, pertence a várias vizinhanças diferentes. Quando esse indivíduo é de algum modo modificado, as alterações que sofreu também irão surtir efeitos nos seus vizinhos nas diferentes vizinhanças em que está inserido, sendo desta forma introduzida variedade genética numa vizinhança por influência exterior. Este mecanismo proporciona a migração de indivíduos, o que potencia uma melhor exploração do domínio de soluções. Além disso, uma vez que as boas soluções se difundem de forma gradual na população, a diversidade genética da população é preservada durante mais tempo nos AGC do que em outros tipo de AG. O tamanho e forma das vizinhanças têm influência no grau de sobreposição de vizinhanças, o que por sua vez determina o equilíbrio entre exploração de novas soluções e intensificação da pesquisa no domínio de soluções.

Nos AGC, para além da política de substituição existe também a política de atualização. A atualização determina a ordem com que se processam os indivíduos colocados na grelha que representa a solução, isto é, a ordem pela qual se executam os ciclos evolutivos nas vizinhanças. A atualização pode ser feita de modo síncrono ou assíncrono. No modo síncrono, o algoritmo executa o ciclo evolutivo para cada posição na grelha, ou seja, para cada indivíduo i da população e respetiva vizinhança. O indivíduo resultante i' , caso tenha aptidão superior ao indivíduo i , é copiado para uma população auxiliar temporária, para a mesma posição do indivíduo i , se não, este último mantém-se nessa posição. No final de cada iteração do algoritmo, a população auxiliar substitui por completo a população atual, isto é, os indivíduos são substituídos simultaneamente em todas as posições da grelha. No algoritmo 4 é apresentado o pseudo-código para um AGC síncrono.

Num AGC, ao aplicar a atualização síncrona, após se gerar a população inicial, começa-se por selecionar o primeiro indivíduo i da população, o qual se encontra na posição que está na posição mais à esquerda da primeira linha da grelha (topo). Em seguida processa-se o indivíduo i , onde decorre a execução do ciclo evolutivo na sua vizinhança de acordo com os seguintes passos:

- 1) Determina-se a vizinhança do indivíduo i ;
- 2) Selecionam-se os progenitores para o cruzamento;
- 3) Obtém-se um indivíduo descendente e tenta-se aplicar mutação;
- 4) Avalia-se o nível de aptidão do descendente;
- 5) O descendente substitui o indivíduo i se possui um nível de aptidão igual ou superior a este.

Estes passos repetem-se usando o próximo indivíduo à direita, e assim por diante até ao fim da linha, passando-se para as linhas seguintes da grelha, percorrendo os indivíduos sempre da esquerda para a direita e de cima para baixo, terminando no indivíduo que está colocado na posição mais à direita na última linha.

Algoritmo 4: Algoritmo Genético Celular Síncrono – Descrição geral

```

1.  Início
2.     $Pop \leftarrow$  Inicializar_População( $N$ );
3.    Avaliar_Aptidão( $Pop$ );
4.    iteração  $\leftarrow$  1;
5.     $A \leftarrow$  grelha.altura;
6.     $C \leftarrow$  grelha.comprimento;
7.    enquanto iteração  $\leq$  maxIterações fazer:
8.       $Pop_{auxiliar} \leftarrow Pop$ ;
9.      de  $i \leftarrow 1$  até  $i \leftarrow A$  fazer:
10.       de  $j \leftarrow 1$  até  $j \leftarrow C$  fazer:
11.          $ind \leftarrow$  individuo.posição( $i, j$ );
12.          $vizinhos \leftarrow$  Determina_Vizinhança( $ind$ );
13.          $progenitores \leftarrow$  Selecionar_Progenitores( $vizinhos$ );
14.          $descendente \leftarrow$  Cruzamento( $progenitores$ );
15.          $k \leftarrow 0$ ;
16.         enquanto  $k <$   $descendente.tamanho$  fazer:
17.           se valorAleatório  $\leq$  probabilidadeMutaçã então;
18.             Mutaçã( $descendente.alelo(k)$ );
19.              $k \leftarrow k + 1$ 
20.         Avaliar_Aptidão( $descendente$ );
21.         Substituir( $Pop_{auxiliar}, ind, descendente$ );
22.          $j \leftarrow j + 1$ ;
23.        $i \leftarrow i + 1$ ;
24.      $Pop \leftarrow Pop_{auxiliar}$ ;
25.     iteração  $\leftarrow$  iteração + 1 ;
26.
27.
28.
29.
30. Fim

```

Na política de atualização de modo assíncrono não se utiliza uma população auxiliar. A ordem pela qual cada indivíduo é selecionado, isto é, a ordem pela qual cada posição na grelha é processada, é determinada segundo um critério específico. Existem quatro critérios de atualização: *line sweep*, *fixed random sweep*, *new random sweep*, e *uniform choice* [4].

No trabalho de Alba et al. [4] são apresentadas comparações de desempenho entre um AGC síncrono e quatro versões de AGC assíncrono (uma para cada critério de atualização). Os autores concluíram que em modo assíncrono de atualização se consegue convergir mais rapidamente para um valor ótimo de solução, contudo, a atualização de modo síncrono permite determinar o valor ótimo com uma taxa de sucesso mais elevada. Como no contexto da recolha de resíduos para reciclagem se pretende obter soluções de forma eficiente, ou seja, soluções de boa qualidade mas de forma rápida, entende-se que a melhor opção é aplicar ao AGC a política de atualização assíncrona.

Ferramentas desenvolvidas com base no algoritmo genético celular

A metodologia dos algoritmos genéticos celulares (AGC) foi escolhida para base de desenvolvimento de um algoritmo para resolver o encaminhamento de veículos no contexto da recolha de RED modelado como um TOP. Não foram encontrados na literatura do TOP aplicações de algoritmos genéticos celulares, porém existem contribuições com essa metodologia para os casos do VRP [3] e do CVRP [2].

Como resultado obteve-se uma ferramenta denominada cGA-TOP (*celular genetic algorithm for team orienteering problem*), desenvolvida com recurso à plataforma JCELL. Esta ferramenta foi expandida, dando origem a um total de nove variantes. As nove variantes da ferramenta permitem resolver as diversas variantes do TOP apresentadas anteriormente neste capítulo. Na Tabela 19 consta a designação e a descrição de cada ferramenta desenvolvida. O AGC desenvolvido para ferramenta cGA-TOP tem em comum com a ferramenta GATOP-3 os seguintes elementos:

- Representação genética
- Algoritmo construtivo
- Operações genéticas de cruzamento e mutação

Tabela 19 - Ferramentas desenvolvidas com base em algoritmos genéticos celulares

Ferramenta	Problema-alvo
cGA-TOP	TOP – Team Orienteering Problem
cGA-TOPTW	TOPTW – TOP with Time Windows
cGA-TOPdTW	TOPdTW – TOP with double Time Windows
cGA-CTOP	CTOP – Capacitated TOP
cGA-CTOPTW	CTOPTW – CTOP with Time Windows
cGA-CTOPdTW	CTOPdTW – CTOP with double Time Windows
cGA-CTOPdTW-HF	CTOPdTW with heterogeneous fleet – HF (frota heterogénea)
cGA-CTOPdTW-MPC	CTOPdTW multi-product collection - MPC (recolha multi-produto)
cGA-CTOPdTW-MPC-HF	CTOPdTW with MPC and HF

A escolha da metodologia dos AGC deveu-se ao facto do seu desempenho se revelar superior ao dos algoritmos genéticos geracionais das ferramentas GATOP-1, GATOP-2 e GATOP-3 em instâncias de teste públicas do TOP que servem como medida de referência para avaliação de desempenho de algoritmos. Em secções posteriores deste capítulo são apresentados os resultados e conclusões que sustentaram esta escolha.

5.4 Experiências com as ferramentas para otimização de rotas

Ao longo deste trabalho de investigação foram desenvolvidas várias ferramentas para resolver problemas de roteamento de veículos modelados como um *team orienteering problem* (TOP) e outras variantes deste. O propósito final de aplicação dessas ferramentas consiste em determinar rotas para efetuar recolha de resíduos de embalagens domésticas (RED) para reciclagem. O problema da recolha de RED, numa abordagem mais simplista pode ser modelado como um TOP. No entanto, o estudo aprofundado da recolha de RED efetuado ao longo deste trabalho de investigação revelou que o modelo do TOP não é suficiente para caracterizar o nível de complexidade do problema em questão. Assim, desenvolveram-se modelos expandidos do TOP, variantes que incluem mais restrições no modelo matemático, e aproximam mais o modelo ao problema real. A progressão ao nível dos modelos baseados no TOP é apresentada na tabela:

Tabela 20 - Progressão na modelação do problema da recolha de RED.

Modelo	Descrição	Restrições Principais
TOP	Team Orienteering Problem	Tempo (duração de rota) - D
TOPTW	TOP with Time Windows	Janelas Temporais (JT)
TOPdTW	TOP with double Time Windows	JT para vértices e veículos (JT2)
CTOP	Capacitated TOP	Capacidade (C)
CTOPTW	CTOP with Time Windows	C + JT
CTOPdTW	CTOP with double Time Windows	C + JT2
CTOPdTW-HF	CTOPdTW with Heterogeneous Fleet	C + JT2 + frota heterogénea (FH)
CTOPdTW-MPC	CTOPdTW with Multi-Product Collection	C + JT2 + recolha multi-produto (RMP)
CTOPdTW-MPC-HF	CTOPdTW with MPC and HF	C + JT2 + FH + RMP

Dos nove modelos apresentados, apenas cinco deles se encontram documentados na literatura da área do TOP. Um total de quatro novos modelos foram desenvolvidos durante esta tese, após se obter conhecimentos específicos sobre o problema da recolha de RED. Esses novos modelos são o CTOPdTW, CTOPdTW-HF, CTOPdTW-MPC e CTOPdTW-MPC-HF.

De modo a se poder antever o possível desempenho dos algoritmos desenvolvidos na resolução dos novos modelos desenvolvidos com base no TOP, propõem-se a realização de experiências com instâncias de teste públicas (*benchmark test instances*), as quais servem como medida de referência ou medida global de avaliação da capacidade de resolução de um algoritmo desenvolvido para solucionar este tipo de problemas de encaminhamento de veículos. Atualmente existem somente instâncias de teste públicas disponíveis para o TOP [26][105][102], para o TOPTW [69][82][83][102][107] e para o CTOP [7][29]. Assim, os testes de avaliação do desempenho dos algoritmos desenvolvidos irão incidir sobre essas instâncias e modelos. Os algoritmos serão comparados entre si, mas também comparados com os melhores algoritmos atualmente identificados na literatura. Após os testes de desempenho pretende-se identificar qual é o melhor algoritmo de entre os que foram desenvolvidos neste trabalho. O algoritmo eleito será a opção final em termos de metodologia para o desenvolvimento das abordagens de agendamento da recolha de RED, cujo desempenho será avaliado em situações reais desse problema.

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos com os diversos algoritmos desenvolvidos neste trabalho em instâncias de teste públicas do TOP, TOPTW e CTOP. São efetuadas comparações entre os algoritmos das ferramentas GATOP-1, GATOP-2, GATOP-3 e cGA-TOP. Também se comparam os desempenhos desses algoritmos com os resultados obtidos por outros autores que apresentam metodologias bem-sucedidas no TOP, TOPTW e CTOP.

5.4.1 Desempenho geral no TOP

As experiências realizadas para avaliação da capacidade das quatro ferramentas em resolver o TOP consistiram em resolver instâncias de teste públicas. Numa primeira fase de testes, incidiu-se apenas em instâncias que foram propostas por Chao et al. [26], as quais perfazem um total de 240 instâncias distribuídas em quatro conjuntos. No entanto, a comparação entre as ferramentas (GATOP-1, GATOP-2, GATOP-3 e cGA-TOP), apenas se focou numa seleção com 10% das instâncias de teste, seis de cada um dos quatro conjuntos, perfazendo um total de 24 instâncias. As instâncias foram selecionadas com vista a incluir diversidade e diferentes níveis de

dificuldade do TOP, para avaliar o desempenho dos algoritmos desenvolvidos de uma forma abrangente, mas ao mesmo tempo a permitir executar os testes de uma forma mais rápida enquanto se encontram os melhores parâmetros de funcionamento dos algoritmos desenvolvidos. Os resultados obtidos nas 24 instâncias de teste foram comparados com os melhores resultados conhecidos na literatura, obtidos por diversos autores e diferentes metodologias, nomeadamente nos trabalhos de Chao et al. [26], Tang e Miller-Hooks [96], Archetti et al. [8], Ke et al. [54], Bouly et al. [18], Boussier et al. [19], Dang et al. [29].

Cada conjunto de instâncias refere-se a um mesmo grafo ou conjunto de n vértices. No primeiro conjunto de instâncias são considerados 100 vértices, no segundo conjunto são 66, no terceiro são 64, e no quarto 102 vértices. Cada instância é caracterizada pelo número de veículos disponíveis (m) para visitar os vértices, e ainda o tempo máximo de cada rota (T_{max}). O valor de m varia entre 2 e 4.

Em testes preliminares foi possível detectar as configurações que permitem obter o melhor desempenho com cada um dos algoritmos desenvolvidos para as ferramentas GATOP-1 [36], GATOP-2 [37], GATOP-3 e cGA-TOP. As referidas configurações constam nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Configurações dos algoritmos das ferramentas GATOP-1 e GATOP-2.

Características	GATOP-1	GATOP-2
Máximo de iterações/ciclos	5000	5000
População	220	220
Cruzamentos (por ciclo)	30	100
Mutações (por ciclo)	10	210
Elite	5	10
Sub-Elite	-	10
Indivíduos aleatoriamente gerados (por ciclo)	10	-

Tabela 22 - Configurações dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP.

Características	GATOP-3	cGA-TOP
Máximo de iterações/ciclos	250	1000
População (N)	$8 \cdot n$	$0.25 \cdot n$
Cruzamentos por ciclo	n	n
Técnica de cruzamento	Dpx	Dpx
Probabilidade de Mutação	$1/3n^*$	$5/n^*$
Vizinhança (configuração)	-	L5

* n é o número de vértices numa instância.

Os testes foram executados num computador portátil com processador Intel Pentium Core2Duo 2.53GHz, e com 4GB de memória RAM. Cada algoritmo/ferramenta processou cada instância 10 vezes. Os resultados obtidos nos testes constam na Tabela 23, onde

$P_{m\acute{a}x}$ refere-se ao valor de pr\u00eamio m\u00e1ximo obtido em cada inst\u00e2ncia com cada um dos algoritmos, ou seja, o melhor valor obtido ao longo das 10 execu\u00e7\u00f5es do algoritmo em cada inst\u00e2ncia. O valor de $P_{m\u00e9d}$ corresponde \u00e0 m\u00e9dia dos pr\u00eamios obtidos em 10 execu\u00e7\u00f5es (Equa\u00e7\u00e3o (33)). Na \u00faltima coluna da tabela apresentam-se os melhores valores conhecidos para cada inst\u00e2ncia.

Tabela 23 - Resultados obtidos em 24 inst\u00e2ncias oficiais do TOP com as ferramentas desenvolvidas.

Inst\u00e2ncia	GATOP-1		GATOP-2		GATOP-3		cGA-TOP		MRL**
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\u00e9d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\u00e9d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\u00e9d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\u00e9d}$	
p4.2.f	643	609.6	684	662	687	685.2	687	682	687
p4.2.o	1081	1004	1178	1116.7	1208	1205.8	1203	1197.6	1218
p4.3.j	818	764.8	854	826.9	861	855.2	861	853	861
p4.3.p	1062	985.7	1174	1119.9	1205	1194	1193	1184	1222
p4.4.k	775	736.7	821	794.5	821	820.6	821	819.4	821
p4.4.r	1054	992.6	1171	1139	1191	1182.2	1187	1176.4	1216
p5.2.p	1090	1066.5	1150	1090	1150	1150	1150	1150	1150
p5.2.z	1675	1627	1660	1633	1680	1680	1680	1680	1680
p5.3.t	1245	1225	1260	1242.5	1260	1259	1260	1257	1260
p5.3.y	1555	1500.5	1590	1561	1590	1590	1590	1590	1595
p5.4.w	1355	1303.5	1380	1357	1380	1380	1390	1384	1390
p5.4.z	1535	1501	1575	1525.5	1585	1576	1585	1606	1620
p6.2.l	1110	1093.2	1116	1090.2	1116	1114.8	1116	1116	1116
p6.2.m	1188	1161.6	1176	1157.4	1188	1188	1188	1188	1188
p6.3.m	1080	1033.8	1080	1069.8	1080	1078.8	1080	1080	1080
p6.3.n	1158	1124.4	1170	1158.6	1170	1170	1170	1170	1170
p6.4.m	906	885	912	902.4	912	912	912	912	912
p6.4.n	1068	1051.8	1068	1068	1068	1068	1068	1068	1068
p7.2.l	722	711.3	763	740.8	767	759.8	767	763.6	767
p7.2.s	1030	967.1	1110	1071.3	1135	1122.8	1126	1124.2	1136
p7.3.o	808	766.6	865	845.9	874	866.8	874	873.4	874
p7.3.t	1017	947.8	1112	1072.5	1117	1115	1113	1100.8	1120
p7.4.p	814	776.7	844	820.8	842	830.8	846	842.8	846
p7.4.s	958	896.6	1020	991.6	1022	1017.2	1021	1015.2	1022

** MLR – Melhor Resultado na Literatura

Na Tabela 24 encontram-se estat\u00edsticas adicionais sobre os resultados obtidos nas 24 inst\u00e2ncias de teste selecionadas. Estas estat\u00edsticas permitem efetuar uma avalia\u00e7\u00e3o mais geral do desempenho de cada algoritmo/ferramenta, e facilita a compara\u00e7\u00e3o entre eles, de modo a identificar qual deles constitui o m\u00e9todo de resolu\u00e7\u00e3o mais vantajoso para aplicar posteriormente ao problema de recolha de res\u00edduos. Na Tabela 24, existem cinco colunas de dados. Na primeira constam os valores m\u00e9dios do desvio relativo percentual m\u00e9dio (\overline{DRPM}) em rela\u00e7\u00e3o ao melhor resultado na literatura (MRL), ao longo das 24 inst\u00e2ncias de teste. O valor de \overline{DRPM} \u00e9 obtido com a Equa\u00e7\u00e3o (31). A segunda coluna da tabela indica a m\u00e9dia da efic\u00e1cia m\u00e1xima ($\overline{E_{m\acute{a}x}}$) obtida com cada algoritmo nas 24 inst\u00e2ncias (Equa\u00e7\u00e3o (32)). Na terceira coluna apresentam-se

os valores médios da eficácia média ($\overline{E_{méd}}$), que é obtida através dos valores de prémio médio ($P_{méd}$ - Equação (33)) alcançado em cada instância, e seguindo a Equação (34). Na quarta coluna consta o número de instâncias para as quais cada algoritmo alcançou o MRL (x-MRL). Na quinta coluna são apresentados os valores médios de tempo de processamento das 24 instâncias com cada algoritmo (\overline{tCPU}). Os valores de \overline{tCPU} são obtidos a partir da Equação (35).

Tabela 24 - Estatísticas sobre os resultados obtidos em 24 instâncias oficiais do TOP.

Ferramenta	DRPM (%)	$\overline{E_{máx}}$ (%)	$\overline{E_{méd}}$ (%)	x-MRL	\overline{tCPU} (s)
GATOP-1	4.82	95.18	91.37	3	343.2
GATOP-2	0.96	99.04	96.53	8	80.4
GATOP-3	0.35	99.65	99.33	15	134
cGA-TOP	0.42	99.58	99.36	16	131

$$\overline{DRPM} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \left(\frac{P_{máx_i} - MRL_i}{MRL_i} \right) \times 100\%}{24} \quad (31)$$

$$\overline{E_{máx}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \frac{|MRL_i - P_{máx_i}|}{MRL_i} \times 100\%}{24} \quad (32)$$

$$P_{méd} = \frac{\sum_{k=1}^{10} P_k}{10} \quad (33)$$

$$\overline{E_{méd}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \frac{|MRL_i - P_{méd_i}|}{MRL_i} \times 100\%}{24} \quad (34)$$

$$\overline{tCPU} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \left(\frac{\sum_{j=1}^{10} tCPU_i}{10} \right)}{24} \quad (35)$$

A partir da Tabela 24 observa-se que o algoritmo da ferramenta GATOP-2 é em média o mais rápido a executar uma das instâncias de teste, uma vez que apresenta o valor de \overline{tCPU} mais baixo. A diferença entre os valores de \overline{tCPU} deve-se ao facto das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP possuírem um algoritmo construtivo (AC) com uma ordem de complexidade $O(n^3)$, que é superior à complexidade do AC das ferramentas GATOP-1 e GATOP-2, a qual é de ordem $O(n^2)$. Um AC mais complexo, ao executar o mesmo número de avaliações (ou descodificações) de

cromossomas que um outro AC menos complexo, irá demorar mais tempo a efetuar cálculos inerentes à descodificação. No caso da ferramenta GATOP-1, esta possui um \overline{tCPU} bem mais elevado que as outras, ou seja, é a ferramenta mais lenta em termos de processamento, mesmo possuindo complexidade $O(n^2)$. Tal situação ocorre devido à estrutura de dados ou própria arquitetura de sistema da ferramenta GATOP-1, que não são tão eficientes como a das restantes ferramentas.

Em termos de qualidade de solução, os melhores algoritmos são os das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP. A ferramenta GATOP-3 apresenta os melhores valores de $\overline{E_{m\acute{a}x}}$ e de $DRPM$. O algoritmo da ferramenta cGA-TOP foi o que alcançou o MRL em mais instâncias (x-MRL), e também o melhor valor de $\overline{E_{m\acute{e}d}}$, podendo-se assim afirmar que esta ferramenta possui o algoritmo mais robusto de entre as quatro desenvolvidas. Em relação a GATOP-3, a sua qualidade de solução é marginalmente menor, e o valor de \overline{tCPU} é ligeiramente inferior.

Neste contexto, o desempenho de um algoritmo pode ser medido em termos de qualidade de solução e de tempo de processamento. Contudo, um dos objetivos neste trabalho consistiu em desenvolver um algoritmo que apresenta soluções para o TOP com boa qualidade e em tempo útil, o que pode ser algo subjetivo. Deve existir um compromisso equilibrado entre qualidade e rapidez de execução. Assim, os algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP apresentam melhores desempenhos globais que os algoritmos das ferramentas GATOP-1 e GATOP-2. Tal pode dever-se a duas razões: 1) os algoritmos foram desenvolvidos com base na plataforma JCELL que atua como base de funcionamento para algoritmos genéticos, sendo esta uma ferramenta bem consolidada, desenvolvida por uma equipa de especialistas em arquitetura de sistemas informáticos, que aplicaram uma estrutura de dados muito eficiente; 2) os mecanismos de descodificação de soluções em cromossomas são melhores no AC destas ferramentas que nas outras duas (GATOP-1 e GATOP-2).

Uma vez que as ferramentas GATOP-3 e cGATOP alcançaram desempenhos muito semelhantes, optou-se por executar testes mais extensivos, de modo a permitir uma avaliação mais completa dos respetivos algoritmos. Avançou-se com a execução de experiências incidindo sobre todas as instâncias de teste públicas do TOP, que no total são 387 instâncias, distribuídas em sete conjuntos, dos quais quatro foram propostos por Chao et al. [26], e os restantes três conjuntos por Tsiligirides [105]. Estas instâncias estão disponíveis em [102]. As configurações dos algoritmos genéticos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP mantiveram-se iguais às utilizadas nos testes iniciais com a seleção de 24 instâncias do TOP. Cada algoritmo processou

cinco vezes cada uma das 387 instâncias de teste. Os melhores resultados obtidos com os algoritmos constam nas Tabelas 98, 99, 100, 101, 102, 103 e 104 (Anexos I). Nestas tabelas existem instâncias cujos valores são iguais a zero, pois não foi possível encontrar soluções para essas instâncias, nem são conhecidas soluções na literatura da área do TOP, pois são instâncias que dado o valor limite disponível para efetuar cada rota não permite visitar nenhum vértice.

Os valores de $P_{mín}$ e $P_{máx}$ correspondem respectivamente aos valores mínimo e máximo de prémio obtido com as rotas determinadas em cada instância de teste. O valor $P_{méd}$ indica o valor médio de prémio contabilizando os resultados das cinco execuções do algoritmo em cada instância. O valor de $P_{mín}$ pode ser considerado um valor mais garantido de prémio, e reflete o nível de robustez geral do algoritmo. O valor de $P_{máx}$ representa a capacidade do algoritmo em alcançar boas soluções (ou ótimas), e é resultante da execução do algoritmo várias vezes sobre a mesma instância, de modo a retirar proveito da aleatoriedade aplicada no algoritmo, aumentado contudo o tempo total de processamento computacional.

A Tabela 25 apresenta os novos valores máximos de prémio alcançados em instâncias de teste do TOP pelos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP. Para estas instâncias, nenhum autor reportou até ao momento presente valores superiores de prémio.

Tabela 25 - Novos valores máximos encontrados para instâncias de teste do TOP com as ferramentas GATOP-3 e cGATOP.

Instância	MRL	Novo MRL	
	Valor anterior	GATOP-3	cGA-TOP
p1.4.n	155	160	160
p6.2.e	360	384	384
p6.2.j	948	972	972
p6.3.h	444	462	462
p6.4.l	696	708	708
p7.4.o	781	784	784
p7.4.q	909	-	910

Nas Tabelas 26, 27, 28 e 29 apresentam-se estatísticas sobre o desempenho geral dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP para o total das 387 instâncias. Na Tabela 26 foi incluído o valor médio da eficácia mínima ($\overline{E_{mín}}$) alcançado pelos dois algoritmos em cada um dos sete conjuntos de instâncias de teste. Este indicador traduz uma garantia ou valor mínimo de desempenho que se pode esperar de um certo algoritmo ao resolver instâncias. O valor de $\overline{E_{mín}}$ é determinado seguindo a Equação (36), onde p denota o número de instâncias que constituem um conjunto.

$$\overline{E}_{mín} = \frac{\sum_{i=1}^p \frac{|MRL_i - P_{mín_i}|}{MRL_i}}{p} \times 100\% \quad (36)$$

Na Tabela 26 apresentam-se estatísticas pormenorizadas sobre a qualidade de solução obtida nos vários conjuntos de instâncias pelas ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP. Em termos médios gerais, GATOP-3 obteve desempenho superior a cGA-TOP relativamente aos valores de \overline{DRPM} , $\overline{E}_{mín}$ e $\overline{E}_{máx}$. Apenas no valor médio de eficiência média ($\overline{E}_{méd}$), o algoritmo de cGA-TOP foi superior ao de GATOP-3.

Tabela 26 - Estatísticas sobre a qualidade de solução obtida nas 387 instâncias de teste do TOP.

Instâncias	GATOP-3				cGA-TOP			
	\overline{DRPM} (%)	$\overline{E}_{mín}$ (%)	$\overline{E}_{máx}$ (%)	$\overline{E}_{méd}$ (%)	\overline{DRPM} (%)	$\overline{E}_{mín}$ (%)	$\overline{E}_{máx}$ (%)	$\overline{E}_{méd}$ (%)
Conjunto 1	0.0	99.99	100	99.99	0.0	99.99	100	99.99
Conjunto 2	0.0	100	100	100	0.0	100	100	100
Conjunto 3	0.0	99.81	100	99.95	0.0	99.95	100	99.99
Conjunto 4	0.380	0.627	99.62	98.88	0.627	98.33	99.37	98.88
Conjunto 5	0.071	0.013	99.93	99.80	0.013	99.80	99.99	99.91
Conjunto 6	-0.05	-0.05	100	99.95	0.0	99.97	100	99.99
Conjunto 7	0.091	0.173	99.90	99.38	0.175	99.12	99.83	99.54
MÉDIA	0.136	99.42	99.92	99.71	0.204	99.59	99.88	99.76

O desempenho dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP foi comparado com outros métodos de solução apresentados por outros autores, os quais detêm atualmente os melhores resultados nas instâncias de teste do TOP. Esses métodos de solução são algoritmos que daqui em diante serão referidos pelos seguintes acrónimos:

- SVF: *slow variable neighbourhood search algorithm* [8]
- ASe: *ant colony optimization sequential algorithm* [54]
- SVNS: *skewed variable neighbourhood search algorithm* [108]
- GLS: *guided local search algorithm* [109]
- PR: *GRASP with path relinking algorithm* [94]
- MSA: *multi-start simulated annealing* [62]
- ALNS: *augmented large neighbourhood search algorithm* [29]

Na Tabela 27 apresentam-se os valores médios de desvio percentual relativo médio, \overline{DPRM} , para os conjuntos de instâncias número 4, 5, 6 e 7. Estes conjuntos são os que contêm instâncias mais difíceis, e são os mais usados para comparações em termos de qualidade de solução. Na Tabela 27, facilmente se observa que o algoritmo ALNS alcançou menor valor de \overline{DPRM} em todos os conjuntos de instâncias, e por conseguinte é considerado o método com melhor qualidade de solução. A ferramenta GATOP-3 obteve melhor desempenho que a cGA-TOP nos conjuntos 4 e 7. Ambas obtiveram o mesmo valor de \overline{DPRM} no conjunto 6, cujo valor é negativo, uma vez que as ferramentas alcançaram novos valores máximos de prémio em duas instâncias, e por conseguinte o seu desempenho é superior aos restantes algoritmos presentes na tabela. No conjunto 5 a vantagem é da ferramenta cGA-TOP. Comparando as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP com os restantes algoritmos, observa-se que ambas obtiveram melhor desempenho que os algoritmos GLS e SVNS nos quatro conjuntos. Além disso, no conjunto 5 o cGA-TOP superou também aos algoritmos SVF, ASe e PR. No geral, ambas as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP apresentam valores de \overline{DPRM} competitivos em relação aos outros métodos do estado da arte.

Tabela 27 - Valores médios de desvio percentual relativo médio (DPRM) obtidos nos conjuntos 4, 5, 6 e 7.

Instâncias	$\overline{DPRM}(\%)$								
	GATOP-3	cGA-TOP	SVF	GLS	ASe	SVNS	PR	MSA	ALNS
Conjunto 4	0.380	0.627	0.110	2.959	0.302	1.462	0.106	0.065	≈0.0
Conjunto 5	0.071	0.013	0.034	2.391	0.036	0.610	0.047	0.007	0.0
Conjunto 6	-0.05	-0.05	0.0	1.776	0.0	0.520	0.0	0.0	0.0
Conjunto 7	0.091	0.173	0.056	3.077	0.004	1.307	0.043	0.029	0.0

Em termos de tempo médio de processamento, os valores obtidos nos sete conjuntos de instâncias constam na Tabela 28. De entre as duas ferramentas desenvolvidas, a que no geral processou mais rápido as instâncias foi cGA-TOP, tendo superado GATOP-3 em cinco dos sete conjuntos. Ambas as ferramentas foram mais rápidas que: SVF e ASe no conjunto 1; GLS e ASe no conjunto 2; SVF e ASe no conjunto 3; e SVF nos conjuntos 4, 5, 6 e 7, tendo sido mais lentas que os restantes algoritmos nesses mesmos conjuntos. Globalmente, as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP apresentam tempos razoáveis de processamento, havendo apenas uma diferença mais substancial nos conjuntos 4, 5, 6 e 7.

Tabela 28 - Tempo médio de processamento nos 7 conjuntos de instâncias de teste do TOP.

Instâncias	$\overline{tCP\bar{U}}$ (s)								
	GATOP-3	cGA-TOP	SVF	GLS	ASe	SVNS	PR	MSA	ALNS
Conjunto 1	2.8	2.6	7.8	2.2	5.8	-	-	-	1.4
Conjunto 2	0.7	0.6	0	2.3	3.2	-	-	-	0.0
Conjunto 3	3.0	3.0	10.2	1.0	6.5	-	-	-	2.6
Conjunto 4	149.6	151.2	457.9	12.7	37.1	7.4	36.7	81.0	77.3
Conjunto 5	35.3	33.7	158.9	5.0	17.4	1.5	11.2	6.6	22.1
Conjunto 6	24.2	23.9	147.9	5.8	16.1	1.9	9.0	1.4	12.3
Conjunto 7	174.8	166.5	309.9	16.7	30.4	4.3	27.3	32.2	66.8

Na Tabela 29, a eficácia dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP é avaliada quanto ao número de instâncias em que obtiveram os melhores resultados conhecidos na literatura (x-MRL). É feita a comparação com o atual melhor algoritmo na literatura em termos de qualidade de solução: o ALNS. A eficácia geral é calculada para cada conjunto de acordo com a Equação (37). Nos conjuntos 1, 2, 3 e 6, as ferramentas desenvolvidas igualaram o algoritmo ALNS. Nos restantes três conjuntos, tanto o GATOP-3 como o cGA-TOP não alcançaram o valor máximo de eficácia. Contabilizando as 387 instâncias de teste, a eficácia geral de GATOP-3 (88.4%) é marginalmente superior à de cGA-TOP (87.1%), ficando um pouco longe dos 98.9% alcançados pelo algoritmo ALNS.

Tabela 29 – Comparação da eficácia dos algoritmos GATOP-3 e cGA-TOP com o atual melhor algoritmo no estado da arte do TOP.

Instâncias	Total de instâncias	x-MRL			Eficácia Geral (%)		
		GATOP-3	cGA-TOP	ALNS	GATOP-3	cGA-TOP	ALNS
Conjunto 1	54	54	54	54	100	100	100
Conjunto 2	33	33	33	33	100	100	100
Conjunto 3	60	60	60	60	100	100	100
Conjunto 4	60	34	27	59	56.7	45	98.3
Conjunto 5	78	72	75	78	92.3	96.2	100
Conjunto 6	42	42	42	40	100	100	95.2
Conjunto 7	60	47	46	59	78.3	76.7	98.3
TOTAL	387	342	337	383	88.4	87.1	98.9

$$Eficácia\ Geral = \frac{xMRL}{total\ de\ instâncias\ no\ conjunto} \times 100\% \quad (37)$$

Após análise dos resultados alcançados pelas ferramentas desenvolvidas nas 387 instâncias de teste do TOP, pode-se afirmar que o desempenho de GATOP-3 é superior a cGA-TOP em quase todas as categorias que foram avaliadas. No entanto, em termos de eficiência média, o

algoritmo da ferramenta cGA-TOP alcançou valores ligeiramente superiores a GATOP-3, e por isso pode-se considerar como o método mais robusto e estável em termos de qualidade de solução.

5.4.2 Desempenho geral no TOPTW

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos com as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP em instâncias de teste públicos do TOPTW. Foram utilizados quatro conjuntos de instâncias para avaliar o desempenho das ferramentas desenvolvidas. Os quatro conjuntos contêm um total de 228 instâncias que foram adaptadas a partir de instâncias propostas por Solomon et al. [93], e por Cordeau et al. [27]. Essas adaptações foram apresentadas por Righini and Salani [82][83], e por Montemanni and Gambardella [69]. Os quatro conjuntos são os seguintes:

- Conjunto 1: pr01-10 [82][83]
- Conjunto 2: pr11-20 [69]
- Conjunto 3: c-r-rc_100 [82][83]
- Conjunto 4: c-r-rc_200 [69]

Da Tabela 105 até à Tabela 116 (Anexos II) são apresentados os resultados alcançados pelas ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP em instâncias de teste do TOPTW. As instâncias de teste estão disponíveis em [102].

Na Tabela 30 apresentam-se estatísticas pormenorizadas sobre a eficácia obtida nos vários conjuntos de instâncias pelas ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP. Em termos médios gerais, GATOP-3 obteve desempenho superior a cGA-TOP nos valores de $\overline{E}_{mín}$, $\overline{E}_{máx}$ e $\overline{E}_{méd}$.

Tabela 30 - Estatísticas sobre a qualidade de solução obtida nas 228 instâncias de teste do TOPTW.

Instâncias (conjuntos)	m	GATOP-3			cGA-TOP		
		$\overline{E}_{mín}$ (%)	$\overline{E}_{máx}$ (%)	$\overline{E}_{méd}$ (%)	$\overline{E}_{mín}$ (%)	$\overline{E}_{máx}$ (%)	$\overline{E}_{méd}$ (%)
pr01-pr10	2	93.6	97	95.6	88.7	92.8	90.6
pr11-pr20		93.4	96.3	94.9	86.1	89.6	87.8
c-r-rc_100		96.6	99.3	98.2	98.5	99.7	99.2
c-r-rc_200		95.2	96.9	96.0	92.9	94.7	95.8
pr01-pr10	3	93.6	96.6	95.5	83.7	87.6	85.6
pr11-pr20		93.9	96.3	95.2	83.1	86.6	84.9
c-r-rc_100		96.3	99.3	98.0	97.3	99.1	98.3
c-r-rc_200		98.2	99	98.6	97.1	97.9	97.5

pr01-pr10	4	93.4	95.8	94.7	82.5	85.5	84.0
pr11-pr20		89.2	94.9	93.1	82.9	85.4	84.1
c-r-rc_100		96.8	98.6	97.8	96.2	98	97.1
c-r-rc_200		99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
MÉDIA							
		95.0	97.5	96.5	90.7	93.1	92.1

O desempenho dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP foi comparado com outros métodos de solução apresentados por outros autores, os quais detêm atualmente os melhores resultados nas instâncias de teste do TOPTW. Esses métodos de solução são algoritmos que daqui em diante serão referidos pelos seguintes acrônimos:

- ACS: *ant colony system* [69]
- ILS: *iterated local search algorithm* [107]
- VNS: *variable neighbourhood search algorithm* [104]
- GRASP-ELS: *GRASP with evolutionary local search algorithm* [59]
- SA: *simulated annealing heuristic* [63]
- GVNS: *granular variable neighbourhood search algorithm* [60]
- I3CH: *iterative three-component heuristic* [47]

Na Tabela 31 apresentam-se os valores médios de desvio percentual relativo médio, \overline{DPRM} , para os quatro conjuntos de instâncias, com o número de veículos (m) a variar entre 2 e 4, perfazendo um total de doze conjuntos de teste (séries). O algoritmo I3CH alcançou menor valor de \overline{DPRM} na maioria das séries de teste (10 em 12), e por conseguinte é considerado o método com melhor qualidade de solução. A ferramenta GATOP-3 obteve melhor desempenho que a cGA-TOP em nove séries de teste, de um total de doze, tendo igualado cGA-TOP no conjunto c-r-rc_200 com $m=4$. Nas séries de teste c-r-rc_100 com $m=2$ e $m=3$, a vantagem é da ferramenta cGA-TOP sobre GATOP-3.

Ainda na Tabela 31, observa-se que a GATOP-3 foi superior a ILS em nove séries de teste, enquanto cGA-TOP apenas o conseguiu em seis séries. A ferramenta GATOP-3 superou ACS em duas séries, enquanto cGA-TOP obteve melhor desempenho que VNS, GRASP-ELS e GVNS na série de teste c-r-rc_100 com $m=2$. Em termos médios gerais, GATOP-3 cGATOP, apresentam valores de \overline{DPRM} competitivos em relação aos outros métodos do estado da arte, principalmente GATOP-3.

Tabela 31 - Valores médios de desvio percentual relativo médio (DPRM) obtidos nos 4 conjuntos de instâncias.

Instâncias (conjunto)	m	$\overline{DPRM}(\%)$								
		GATO P-3	cGA-TOP	ACS	ILS	VNS	GRAS P- ELS	SA	GVNS	I3CH
pr01-pr10	2	4.400	9.357	3.41	6.06	3.72	2.04	2.29	1.62	0.94
pr11-pr20		5.084	12.166	6.14	7.84	3.62	3.56	3.87	2.17	2.69
c-r-rc_100		1.813	0.838	0.71	1.93	1.05	1.36	0.13	1.72	0.47
c-r-rc_200		3.972	6.234	3.14	3.06	0.97	0.65	0.92	1.42	0.43
pr01-pr10	3	4.783	14.367	3.99	6.57	3.62	1.97	2.33	1.13	0.35
pr11-pr20		4.790	15.124	6.5	9.08	3.24	3.15	3.7	1.69	1
c-r-rc_100		2.002	1.764	1.41	2.36	1.19	1.56	0.4	1.83	0.16
c-r-rc_200		1.375	2.541	0.83	1.1	0.12	0.06	0.46	0.25	-0.01
pr01-pr10	4	5.284	16.046	3.3	6.8	3.28	2.23	1.93	1.33	0.05
pr11-pr20		6.897	15.870	5.35	7.5	2.46	2.4	2.92	1.77	-0.64
c-r-rc_100		2.225	2.929	1.66	3.11	1.56	1.53	0.47	1.84	0.06
c-r-rc_200		0.428	0.428	0.02	0	0	0	0	0	0
MÉDIA		2.449	6.933	3.005	4.486	1.919	1.679	1.557	1.377	0.415

Em termos de tempo médio de processamento, os valores obtidos nos quatro conjuntos de instâncias constam na Tabela 32. De entre as duas ferramentas desenvolvidas, a que no geral processou mais rápido as instâncias foi cGA-TOP, tendo superado GATOP-3 em todas as séries de teste excepto uma. Ambas as ferramentas foram mais rápidas que ACS em cinco séries, e que VNS numa série apenas. Globalmente, as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP apresentam tempos razoáveis de processamento, havendo apenas uma diferença mais substancial nos conjuntos pr01-pr10 e pr11-pr20 nas séries com m=2, m=3 e m=4.

Tabela 32 - Tempo médio de processamento nos 4 conjuntos de instâncias de teste do TOPTW.

Instâncias (conjunto)	m	$\overline{tCPU}(s)$								
		GAT OP-3	cGA-TOP	ACS	ILS	VNS	GRASP - ELS	SA	GVNS	I3CH
pr01-pr10	2	2652	1410	623.6	3.8	524.8	6.4	137.4	12.9	247.1
pr11-pr20		2999	1591	787	4.1	618.8	9.5	159.3	27.2	304.6
c-r-rc_100		143	134	422	0.7	68.8	8.8	27.3	24.4	69.3
c-r-rc_200		609	503	733.5	2.1	813.7	6.9	60.7	6.5	463.8
pr01-pr10	3	3494	1784	714.1	7.3	473.2	13.4	155.6	28.3	424
pr11-pr20		3838	2028	735.3	7.7	517.5	14.2	198.9	49.7	497
c-r-rc_100		186	170	469.2	1.2	68.9	11.6	36.3	30.1	135.9
c-r-rc_200		324	393	443.8	1.4	322.3	1.2	41.3	2.4	89.2
pr01-pr10	4	4339	2246	807.7	11.1	403.2	15.1	201.9	42	566.5
pr11-pr20		4555	2593	852.6	10.9	408	21.6	224.3	76.8	728.6
c-r-rc_100		242	214	502.6	1.9	66.8	13.2	46.1	28.6	199.5
c-r-rc_200		60	60	81	0.8	141.2	0	32	0.2	0.2

Na Tabela 33, a eficácia dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP é avaliada quanto ao número de instâncias em que obtiveram os melhores resultados conhecidos na literatura (x-MRL). É feita a comparação com o atual melhor algoritmo na literatura em termos de qualidade de solução: o I3CH. Em nenhuma das séries de teste as ferramentas desenvolvidas conseguiram igualar o algoritmo I3CH. Considerando os resultados nas 228 instâncias de teste, a eficácia geral de GATOP-3 (30.3%) é marginalmente superior à de cGA-TOP (29.8%), ficando no entanto ainda distante dos 100% de eficácia alcançados por I3CH. Uma explicação para esta diferença na eficácia pode residir no facto de as configurações dos algoritmos de GATOP-3 e cGA-TOP para resolver o TOPTW serem iguais às usadas na resolução do TOP. O TOP e TOPTW são problemas de diferente complexidade, e os parâmetros que resultaram bem na resolução do TOP podem não resultar tão bem no TOPTW. Além disso, o algoritmo construtivo mantém-se o mesmo para todas as variantes do TOP, e o conceito de descodificação de soluções adoptado pode não ser a melhor opção para o TOPTW.

Tabela 33 - Comparação da eficácia dos algoritmos GATOP-3 e cGA-TOP com o atual melhor algoritmo no estado da arte do TOPTW.

Instâncias (conjunto)	m	Nº de instâncias	x-MRL			Eficácia Geral (%)		
			GATOP-3	cGA-TOP	I3CH	GATOP-3	cGA-TOP	I3CH
pr01-pr10	2	10	2	2	10	20	20	100
pr11-pr20		10	0	0	10	0	0	100
c-r-rc_100		29	12	16	29	41.4	55.2	100
c-r-rc_200		27	1	0	27	3.7	0	100
pr01-pr10	3	10	0	0	10	0	0	100
pr11-pr20		10	0	0	10	0	0	100
c-r-rc_100		29	9	9	29	31.0	31.0	100
c-r-rc_200		27	14	10	27	51.9	37.0	100
pr01-pr10	4	10	1	1	10	10	10	100
pr11-pr20		10	1	1	10	10	10	100
c-r-rc_100		29	3	3	29	10.3	10.3	100
c-r-rc_200		27	26	26	27	96.3	96.3	100
TOTAL		228	69	68	228	30.3	29.8	100

Uma vez analisados os resultados alcançados pelas ferramentas desenvolvidas nas 228 instâncias de teste do TOPTW, pode-se afirmar que o desempenho de GATOP-3 é superior a cGA-TOP em quase todas as categorias que foram avaliadas, e portanto pode-se considerar como o método mais robusto e estável em termos de qualidade de solução. A ferramenta cGATOP obtém vantagem apenas em termos de tempo de processamento, que em todos os testes obteve valores mais baixos que GATOP-3.

5.4.3 Desempenho geral no CTOP

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos com as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP em instâncias de teste públicas do CTOP. Até ao momento apenas foi proposto um conjunto de instâncias públicas de teste que contém um total de 120 instâncias, as quais que foram adaptadas a partir de instâncias projetadas para o CVRP (*capacitated vehicle routing problem*) por Christofides et al. [27]. As instâncias adaptadas do CVRP para o CTOP foram apresentadas por Archetti et al. [7], e estão disponíveis em [102]. Nessas instâncias, o número de veículos varia entre 2 e 4. Na Tabela 117 (Anexos III) são apresentados os resultados alcançados pelas ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP em instâncias de teste do CTOP.

Em termos de novos valores máximos obtidos em instâncias de teste do CTOP, as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP conseguiram estabelecer um novo valor máximo para uma instância.

Tabela 34 - Novos valores máximos encontrados para instâncias de teste do CTOP com as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP.

Instâncias	MRL		
	Valor anterior	GATOP-3	cGA-TOP
p06-2-75-75	183	185	185

Na Tabela 35 apresentam-se estatísticas pormenorizadas sobre a eficácia obtida no conjunto de instâncias pelas ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP. Em termos médios gerais, cGA-TOP obteve desempenho superior a GATOP-3 nos valores de \overline{E}_{min} , \overline{E}_{max} e \overline{E}_{med} .

Tabela 35 - Estatísticas sobre a qualidade de solução obtida nas 120 instâncias de teste do CTOP.

Instâncias	GATOP-3				cGA-TOP			
	\overline{E}_{min} (%)	\overline{E}_{max} (%)	\overline{E}_{med} (%)	x-MRL	\overline{E}_{min} (%)	\overline{E}_{max} (%)	\overline{E}_{med} (%)	x-MRL
Conjunto 1	99.53	99.94	99.78	96	99.83	99.98	99.92	102

O desempenho dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP foi comparado com outros métodos de solução apresentados por outros autores, os quais detêm atualmente os melhores resultados nas instâncias de teste do CTOP. Esses métodos de solução são algoritmos que daqui em diante serão referidos pelos seguintes acrónimos:

- BP: *exact algorithm (Branch&Price)* [7]
- VNS: *variable neighbourhood search algorithm* [7]
- TSF: *tabu search heuristic (feasible version)* [7]
- TSA: *tabu search heuristic (admissible version)* [7]
- BiF&F-s: *Bi-level Filter-and-Fan method (slow version)* [97]
- ADEPT-RD: *adaptive ejection pool with toggle-rule diversification approach* [64]

Na Tabela 36 apresentam-se os valores médios de desvio percentual relativo médio, \overline{DPRM} , para o conjunto de instâncias de teste. O algoritmo ADEPT-RD alcançou menor valor de \overline{DPRM} (0%), e por essa razão pode ser considerado o método com melhor qualidade de solução. A ferramenta cGA-TOP (0.084%) obteve melhor desempenho que GATOP-3 (0.218%).

Ainda na Tabela 31, observa-se que a cGA-TOP obteve melhores de \overline{DPRM} do que os métodos BP, VNS, TSF e TSA, enquanto GATOP-3 apenas superou BP e TSA. O algoritmo ADEPT-RD é o que apresenta a melhor qualidade de solução com valores nulo de \overline{DPRM} . Contudo, avaliando globalmente os desempenhos de cGA-TOP e GATOP-3, ambos os métodos apresentam valores de \overline{DPRM} competitivos em relação aos outros métodos do estado da arte, havendo vantagem de cGATOP sobre GATOP-3.

Tabela 36 - Valores médios de desvio percentual relativo médio (DPRM) obtidos nas instâncias de teste.

Instâncias	$\overline{DPRM}(\%)$							
	GATOP-3	cGA-TOP	BP	VNS	TSF	TSA	BiF&F-s	ADEPT-RD
Conjunto 1	0.218	0.084	0.587	0.085	0.143	0.234	0.011	0.0

Na Tabela 37 apresentam-se os valores de \overline{tCPU}_{best} , que é o tempo médio de processamento de cada algoritmo para obter a melhor solução que conseguem alcançar em cada execução do algoritmo. O valor de $tCPU_{best}$, corresponde ao tempo que o algoritmo demora a alcançar o valor de prêmio máximo (P_i) durante a execução da instância i . O cálculo de \overline{tCPU}_{best} é determinado segundo a Equação (38), onde p denota o total de instâncias de teste, e $tCPU_{best_j}$ indica o tempo de processamento para alcançar P_i na execução j da instância i . De entre as duas ferramentas desenvolvidas, a mais rápida foi GATOP-3 (35.6 segundos), quase metade do tempo de cGA-TOP (68.9 segundos). Globalmente, ambas as ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP apresentam tempos de processamento adequados a uma utilização num sistema e apoio à decisão, tendo obtido um valor de \overline{tCPU}_{best} muito próximo do algoritmo mais rápido, o

ADEPT-RD (33.2 segundos), e além disso foram mais rápidas que os métodos BP, VNS, TSF e TSA.

Tabela 37 - Tempo médio de processamento nas 120 instâncias de teste do CTOP.

Instâncias	\overline{tCPU}_{best} (s)							
	GATOP-3	cGA-TOP	BP	VNS	TSF	TSA	BiF&F-s	ADEPT-RD
Conjunto 1	35.6	68.9	1423.6	967.2	473.2	671.5	3.59	33.2

$$\overline{tCPU}_{best} = \frac{\sum_{i=1}^p \left(\frac{\sum_{j=1}^5 tCPU_{best_j}}{5} \right)}{p} \quad (38)$$

Na Tabela 38, a eficácia dos algoritmos das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP é quantificada em relação ao número de instâncias em que obtiveram os melhores resultados conhecidos na literatura (x-MRL). É feita a comparação com o atual melhor algoritmo na literatura em termos de qualidade de solução: o ADEPT-RD. O algoritmo ADEPT-RD alcançou o prêmio máximo em 119 instâncias, de um total de 120. O cGATOP obteve prêmio máximo (MRL) em 102 instâncias, enquanto GATOP-3 apenas em 96. A eficácia geral de cGA-TOP (85%) é superior à de GATOP-3 (80%). Ambas as ferramentas apresentam um desempenho interessante em termos de eficácia geral, contudo o algoritmo ADEPT-RD obtém um desempenho superior (99.2%).

Tabela 38 - Comparação da eficácia dos algoritmos GATOP-3 e cGA-TOP com o atual melhor algoritmo no estado da arte do CTOP.

Instâncias	Nº de instâncias	x-MRL			Eficácia Geral (%)		
		GATOP-3	cGA-TOP	ADEPT-RD	GATOP-3	cGA-TOP	ADEPT-RD
Conjunto 1	120	96	102	119	80.0	85.0	99.2

5.4.4 Conclusões sobre o desempenho geral das ferramentas desenvolvidas

Os testes de desempenho geral das ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP incidiram na resolução de três problemas de encaminhamento de veículos que têm estado em foco de investigação durante a última década: o TOP o TOPTW e o CTOP. Existem disponíveis uma série de conjuntos de instâncias de teste de acesso público que a maioria dos autores utiliza para avaliar o desempenho de algoritmos que desenvolvem para resolver os problemas de encaminhamento de veículos mencionados. As ferramentas GATOP-3 e cGA-TOP foram utilizadas para resolver

vários conjuntos de instâncias do TOP, TOPTW e CTOP, e os resultados alcançados foram comparados com outros métodos disponíveis na literatura desta área de investigação científica.

Nos testes com instâncias do TOP, verificou-se um grande equilíbrio entre ferramentas desenvolvidas em termos de qualidade de solução, rapidez e eficácia. Apesar de GATOP-3 ter alcançado um desempenho geral marginalmente superior, a robustez de cGA-TOP é uma característica determinante, e fundamenta a nossa escolha dessa ferramenta como método preferencial para resolução de instâncias do TOP.

No caso do TOPTW, os resultados obtidos nas instâncias de teste tornaram evidente o desempenho superior de GATOP-3 em relação a cGA-TOP. Assim, considerando as duas ferramentas desenvolvidas, GATOP-3 constitui a melhor opção em termos de metodologia a aplicar para resolver instâncias do tipo TOPTW.

Após análise dos resultados alcançados nos testes com instâncias do CTOP, a ferramenta cGA-TOP destacou-se em relação a GATOP-3, uma vez que obteve desempenho superior em todas as categorias de avaliação consideradas. Assim, o algoritmo da ferramenta cGA-TOP deve ser o método a aplicar quando se pretende resolver instâncias do CTOP.

No caso do problema real da empresa Braval, o processo da recolha de RED foi modelado como uma combinação dos modelos TOP, TOPTW e CTOP, e ainda outras restrições extra. Deste modo, elegeu-se a ferramenta cGA-TOP como o método de solução a aplicar para resolver as instâncias decorrentes da atividade da Braval, uma vez que cGA-TOP se destaca de GATOP-3 em termos de tempo de processamento das instâncias TOP e TOPTW, e apresenta melhor qualidade de solução em instâncias do TOP e CTOP.

CAPÍTULO VI

AGENDAMENTO DE ROTAS DE RECOLHA DE RESÍDUOS

6.1 Especificações do processo de recolha de resíduos no caso de estudo

O processo de recolha seletiva de resíduos para reciclagem assenta num problema de gestão de recursos humanos e materiais. Esse problema centra-se especialmente na gestão de frota, onde é necessário coordenar os veículos e respetivos condutores, que uma empresa tem disponíveis para concretizar a recolha. Como foi mencionado antes neste documento, uma via que pode conduzir a melhorias significativas relativamente à eficiência da recolha de resíduos é a introdução de melhores práticas no âmbito da gestão de frota. A execução de rotas de recolha otimizadas permite que se efetue melhor gestão dos recursos, se utilizem os recursos de forma eficaz, e se diminuam os custos operacionais.

A gestão do processo de recolha de RED para reciclagem engloba quatro recursos principais:

- Veículos de recolha;
- Trabalhadores (condutores e ajudantes);
- Ecopontos;
- Tempo.

No caso da empresa Braval existem dez veículos dedicados à recolha de resíduos em ecopontos. Aos veículos podem ser acoplados contentores de carga com diferentes capacidades, porém nem todos os contentores podem ser usados por cada um dos veículos. Na Tabela 39 são apresentadas as possíveis combinações veículo-contentor, onde a marca ● assinala os contentores de carga que cada veículo consegue acoplar.

Tabela 39 - Combinações possíveis entre veículos e contentores de carga.

Veículo	Capacidade dos contentores de carga							
	7 m ³	9 m ³	15 m ³	16 m ³	17 m ³	20 m ³	25 m ³	30 m ³
1	●							
2				●	●	●		
3				●				
4				●	●	●		
5				●	●	●	●	●
6				●	●	●	●	
7		●						
8				●				
9			●					
10			●					

Uma característica interessante de alguns veículos é o facto de incluírem um sistema compactador, o qual permite compactar até 30% a quantidade de resíduos dos tipos papel, cartão, plásticos e metais que são colocados no contentor de carga. Por exemplo, um contentor de capacidade 20 m³ pode ser compactado ao ponto de incluir até mais 6 m³ adicionais de resíduos, e pode deste modo recolher uma quantidade total ocupa 26 m³.

Uma particularidade associada à frota da Braval que é importante referir é que existe um número limitado de contentores disponíveis para cada uma das capacidades de carga referidas, os quais são apresentados em seguida na Tabela 40.

Tabela 40 - Número de contentores de carga disponíveis em função da capacidade.

Contentores disponíveis	Capacidade dos contentores de carga							
	7 m ³	9 m ³	15 m ³	16 m ³	17 m ³	20 m ³	25 m ³	30 m ³
	1	1	4	1	1	15	2	2

Outras características relativamente aos veículos da Braval constam na Tabela 41. Relativamente aos tipos de fileira (Tabela 41), estes referem-se aos diferentes tipos de contentores presentes nos ecopontos, e são três: V, P e E, que se referem respetivamente ao vidro, papelão e embalão. Existem quatro veículos com módulo de carga do tipo caixa fixa aberta. Os restantes seis veículos possuem o dispositivo compactador, sendo que o dos veículos 9 e 10 é do tipo fixo (inamovível). Por esta razão estes veículos são usados exclusivamente na

recolha de papelões e embalões, uma vez que o compactador fixo estaria a ser subaproveitado na recolha de vidro, pois este tipo de resíduo praticamente não é compactável.

Tabela 41 - Características dos veículos da frota da Braval.

Veículo	Consumo L/100 km	Depósito de Combustível - L	Tipo	Tipos de Fileira			Capacidade Vidro kg
				V	P	E	
1	23.15	100	Caixa Fixa Aberta	×	×	×	6840
2	63.74	300	Compactador	×	×	×	12320
3	25.19	300	Caixa Fixa Aberta	×	×	×	11680
4	59.65	300	Compactador	×	×	×	12560
5	66.63	300	Compactador	×	×	×	18900
6	74.92	300	Compactador	×	×	×	18080
7	27.85	150	Caixa Fixa Aberta	×	×	×	5960
8	53.65	300	Caixa Fixa Aberta	×	×	×	14320
9	44.04	300	Compactador Fixo		×	×	-
10	48.01	300	Compactador Fixo		×	×	-

De acordo com a estratégia de atuação da Braval, a distribuição de tarefas de recolha de resíduos pelos veículos consta na Tabela 42, onde se pode observar que nem todos os veículos são utilizados em todos os municípios onde a empresa atua. A marca ● indica que um veículo é utilizado num dado concelho.

Tabela 42 - Utilização dos veículos nos concelhos onde atua a Braval.

Veículo	Municípios / Concelhos					
	Amares	Braga	Póvoa de Lanhoso	Terras de Bouro	Vieira do Minho	Vila Verde
1	●	●	●	●	●	●
2	●	●	●	●	●	●
3	●	●	●	●	●	●
4		●	●	●	●	●
5		●			●	●
6	●	●				●
7		●	●	●	●	●
8		●	●	●		●
9		●	●	●	●	●
10		●	●	●	●	●

Cada veículo da Braval é normalmente operado por dois trabalhadores: um condutor e um ajudante. Os condutores têm de cumprir um descanso semanal de 45 horas, e essa regra pode

ser uma condicionante em termos de planeamento de rotas e agendamento de recolhas. Contudo, de modo a simplificar a modelação do problema, assume-se que existem sempre condutores e ajudantes disponíveis para as rotas que serão determinadas e agendadas.

Os ecopontos são recursos da Braval que necessitam de monitorização em termos do estado de enchimento dos seus contentores, e tal pode ser conseguida através dos modelos de previsão da geração de resíduos apresentados no Capítulo 4.

Por fim, outro recurso importante é o tempo. O tempo de cada turno de trabalho e o horário semanal de atuação da Braval condicionam o planeamento das rotas de recolha e o seu posterior agendamento. A par disso, cada contentor de ecoponto tem associado a si um intervalo de tempo ótimo durante o qual se devem recolher os resíduos nele acumulados. Estes intervalos devem ser considerados durante a concepção das rotas de recolha otimizadas.

Em termos de horários e duração de turnos, a Braval segue o seguinte estratégia de recolha:

- **Circuito Normal – C1:**

- Realizado em todos os municípios (Amares, Braga, Póvoa de Lanhoso, Terras de Bouro, Vieira do Minho e Vila Verde)
- Frequência de execução: Segunda a Sexta (todos os municípios) das 8h00 às 12h00 e das 13h00 às 17h00.
- Implica retorno obrigatório à Braval na hora de almoço (das 12h às 13h) e descarga dos resíduos recolhidos.

- **Circuito Braga Noturno – C2:**

- Realizado apenas no município de Braga (freguesias centrais).
- Frequência de execução: Diária (excepto noite de Sábado para Domingo), das 19h30 às 1h30 (Segunda a Sexta) e das 21h às 3h00 (Domingo), com pausa de 15 min a meio.
- 2 Rotas Fixas (cada rota tem dois camiões, um efetua a recolha de papelão e o outro do embalão); na rota noturna não é efectuada a recolha de vidro.

Tabela 43 – Horários de trabalho da Braval para a recolha de RED nos circuitos C1 e C2.

Horas	Dias da Semana										
	Domingo	2ª feira		3ª feira		4ª feira		5ª feira		6ª feira	Sábado
00h00			C2		C2		C2		C2		C2
01h00											
02h00											
03h00											
04h00											
05h00											
06h00											
07h00											
08h00											
09h00		C1		C1		C1		C1		C1	
10h00											
11h00											
12h00											
13h00											
14h00		C1		C1		C1		C1		C1	
15h00											
16h00											
17h00											
18h00											
19h00											
20h00					C2		C2		C2		C2
21h00											
22h00	C2										
23h00											

Além da duração dos turnos, um elemento que deve ser considerado aquando da determinação das rotas de recolha é o tempo despendido para descarregar para o camião os resíduos acumulados num ecoponto. De modo a determinar a duração média de uma recolha, foi realizada um acompanhamento das operações da Braval a bordo de camiões enquanto executavam de rotas de recolha. Para a duração da uma recolha de ecoponto devem-se considerar dois elementos: o tempo de preparação (*setup*), e o tempo de recolha efetiva (descarga). O tempo de *setup* inclui o estacionamento e alinhamento do veículo com o ecoponto. O valor do tempo de *setup* varia entre 30 e 60 segundos, mas em média situa-se mais próximo dos 30 segundos, e será esse o valor a considerar aquando da determinação das rotas de recolha.

O tempo de recolha efetiva diz respeito ao ato de manobrar a grua para levantar um contentor, descarregá-lo para o camião e reposicioná-lo no ecoponto. Como foi referido

anteriormente, cada ecoponto é constituído por um ou mais contentores, e cada contentor é específico para um tipo de resíduos. Existem três tipos de contentor: papelão, embalão e vidro. Além disso, um contentor pode ser do tipo subterrâneo ou de superfície. Fatores como o tipo de ecoponto e o tipo de contentores a recolher são relevantes para contabilizar o tempo que um contentor demora a ser recolhido. Na Tabela 44 constam os tempos de descarga referentes a cada tipo de contentor e ecoponto.

Tabela 44 - Tempos de descarga de acordo com o tipo de contentor e de ecoponto.

Tipo de Ecoponto	Tipo de Contentor	Tempo de Descarga
Subterrâneo	Papelão	3 min
	Embalão	3 min
	Vidrao	4.5 min
Superfície	Papelão	2.5 min
	Embalão	2.5 min
	Vidrao	3 min

6.2 Metodologia desenvolvida

A estratégia de agendamento de recolhas de RED levada a cabo por várias empresas assenta na execução de rotas fixas, repetidas ciclicamente, onde a maioria dos ecopontos são visitados sem se considerar previamente a frequência de visita apropriada para cada ecoponto, o que resulta em deslocações desnecessárias a ecopontos que não se encontram num estado de enchimento que justifique a recolha. De modo a alterar este esquema de visitas, pretende-se estudar hipóteses de modelação do problema de agendamento de rotas, tendo por base a situação da empresa Braval. A ideia geral consiste em agrupar contentores de ecopontos de forma a criar rotas para cada dia de recolha. As hipóteses de modelação que se pretende explorar seguem duas abordagens diferentes. A primeira assenta no agrupamento de contentores de ecopontos em rotas por análise de aglomerados (*clusters*) e frequência de recolha, enquanto a segunda abordagem se foca no agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores em ecopontos. Ambas as abordagens serão apresentadas em seguida, e as hipóteses de modelação serão desenvolvidas para se obter um método de agendamento, sem no entanto negligenciar importantes restrições existentes em termos de recursos necessários para efetuar a recolha tais como os veículos e os tempos dos turnos. No caso da Braval, em termos de veículos, é importante não esquecer que apenas existem dez unidades disponíveis para servir diariamente seis concelhos, e que cada veículo alocado tem

uma capacidade máxima de carga. Quanto ao tempo de cada turno, este limita em parte a distância que é possível percorrer na rota e/ou o número de ecopontos/contentores possíveis de visitar/recolher. As hipóteses de modelação a explorar serão desenvolvidas para a situação específica de recolha no concelho de Amares, a qual é feita apenas de segunda a sexta-feira, segundo o horário do circuito C1 (Tabela 43).

6.2.1 Agrupamento de contentores em rotas por análise de aglomerados (clusters)

O agendamento de rotas de recolha de RED pode assentar na atribuição de rotas a aglomerados ou *clusters* de contentores de ecopontos. Um *cluster* é um conjunto de contentores do mesmo tipo agrupados com base num ou mais fatores, por exemplo, a distância entre eles, ou a frequência de recolha, etc. Nesta abordagem, a cada *cluster* identificado é associada uma rota específica. As rotas incluem sempre uma parte dos contentores que pertencem ao *cluster* a que cada uma delas que está associada, de acordo com as frequências de recolha de cada contentor. No entanto existem frequências de recolha diferentes para cada contentor, e por essa razão, os que têm frequência mais baixa são incluídos menos vezes na rota associada ao *cluster* a que pertencem. Por outro lado, contentores com frequência de recolha mais elevada serão mais vezes incluídos na rota, sendo que alguns poderão constar sempre da lista de contentores a visitar, tornando assim a rota do *cluster* parcialmente fixa, introduzindo alguma rotina na recolha, o que é sempre um elemento positivo para os condutores dos veículos. No geral, pretende-se agrupar contentores de forma a criar um padrão de recolha semanal ou mensal, procurando identificar quais os contentores mais prioritários que podem ter um ou mais dias da semana fixos para a sua recolha, que será feita em conjunto com outros contentores do mesmo *cluster* que já se encontrem devidamente preenchidos.

A determinação de *clusters* assentou na utilização da ferramenta de software desenvolvida em JCELL para efetuar o encaminhamento de veículos, a qual foi aplicada a um conjunto de diferentes cenários de otimização de rotas previamente elaborados. Para cada cenário estipulou-se que seriam calculadas rotas para três veículos, e que cada rota iria corresponder a um *cluster*. A ideia inicial passa por atribuir um dia da semana a cada *cluster*, e os *clusters* com contentores de maior frequência poderão ter mais do que um dia por semana alocado. Foi tomada esta decisão devido ao facto de existirem contentores em Amares que enchem a cada 3,

4, 5 e 7 dias; uma vez que neste concelho a Braval só recolhe de segunda a sexta-feira, os contentores com frequência de recolha mais elevada devem ser recolhidos uma ou mais vezes por semana, o que permite que sejam atribuídos dias fixos para a recolha de cada um deles. Por exemplo, os contentores com frequência de 3 dias podem ser, recolhidos todas as segundas e quintas-feiras caso pertençam ao mesmo *cluster*. Deste modo, a rota do *cluster* a que pertencem esses contentores será executada às segundas e quintas-feiras, e irá incluir outros contentores do mesmo *cluster* que estejam prontos a serem recolhidos num desses dois dias.

Idealmente pretende-se que para cada dia da semana sejam visitados contentores de um só *cluster*, de modo a garantir menores distâncias percorridas e uma maior eficiência das rotas em termos de quantidade recolhida por unidade de distância. Poderão no entanto ocorrer situações em que no mesmo dia se recolham contentores de mais do que um *cluster*, pois coordenar os ritmos de enchimento com os dias fixos de cada *cluster* pode por vezes ser pouco prático do ponto de vista operacional.

Com a execução dos vários cenários de teste pretende-se:

- Identificar os *clusters* que se formam em cada cenário e averiguar se ocorre considerável variação na alocação dos contentores aos *clusters*.
- Analisar casos particulares de contentores com frequência de agrupamento semelhante e averiguar se podem ser associados ao mesmo *cluster*/rota.

Os modelos de otimização de rotas utilizados para executar os cenários de teste foram o TOP e o CTOP. Ao calcular as rotas (*clusters*), estabeleceram-se duas versões para cada cenário. Numa versão (A) aplicou-se uma função-objetivo que maximiza os pontos de prioridade obtidos. Na outra versão (B), a função-objetivo implicava a minimização da distância total percorrida pelos veículos. Os cenários testados constam na Tabela 45. Os valores aleatórios de enchimento utilizados foram gerados de acordo com a quantidade diária que se acumula em cada ecoponto, ou seja, um ecoponto que por exemplo enche a cada 4 dias, acumula diariamente 25% da sua capacidade, por isso os valores aleatórios possíveis de gerar são 0%, 25%, 50%, 75% e 100%.

Tabela 45 - Cenários de teste para identificação de *clusters* para Papelões e Embalões.

Cenário	Turno (horas)	Capacidade (veículos)	Enchimento (ecopontos)	Pontos de Prioridade (PP)	Função - Objetivo	Observ.
1A	S.L.	S.L.	100%	PP = 1	Max. PP	-
1B	S.L.	S.L.	100%	PP = 1	Min. Dist	(1)
2A	8	S.L.	100%	PP = 1	Max. PP	-
2B	8	S.L.	100%	PP = 1	Min. Dist	(1)

3A	8	30 m ³	100%	$PP = 1$	Max. PP	-
3B	8	30 m ³	100%	$PP = 1$	Min. Dist	(1)
4A	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	-
4B	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1)
5A	8	30 m ³	>=50% (aleatório)	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	-
5B	8	30 m ³	>=50% (aleatório)	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1)
6A	8	30 m ³	0 a 100% (aleatório)	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	(2)
6A	8	30 m ³	0 a 100% (aleatório)	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1) (2)
7A	8	30 m ³	(3)	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	-
7B	8	30 m ³	(3)	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1)
8A-7d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	(1) (4)
8B-7d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1) (4)
8A-10d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	(1) (5)
8B-10d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1) (5)
8A-15d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	(1) (6)
8B-15d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1) (6)
8A-30d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Max. PP	(1) (7)
8B-30d	8	30 m ³	100%	$PP = \frac{Q_a+Q_d}{Cap_i}$ (arred. 0 c.d)	Min. Dist	(1) (7)

S.L. - Sem Limite; PP - Pontos de prioridade; Max. PP - Maximizar Pontos de Prioridade; Min. Dist - Minimizar Distância Percorrida; Q_a - quantidade atual no contentor/ecoponto; Q_d - quantidade diária que se acumula no contentor/ecoponto; Cap_i - capacidade do contentor/ecoponto i .

(1) Recolhe mínimo de 99% da capacidade dos veículos;

(2) Recolhe apenas ecopontos com $Q_a \geq 50\%$;

(3) Ecopontos com frequência de recolha menor ou igual a 10 dias ficam a 100%, e os restantes com um valor aleatório entre 50% e 100%, para forçar a recolha dos ecopontos mais críticos (prioritários);

(4) Apenas ecopontos com frequência de recolha até 7 dias são considerados;

(5) Apenas ecopontos com frequência de recolha até 10 dias são considerados;

(6) Apenas ecopontos com frequência de recolha até 15 dias são considerados;

(7) Apenas ecopontos com frequência de recolha até 30 dias são considerados.

De modo a explicar o processo de determinação de *clusters*, será tomado como exemplo o caso dos papelões, pois a lógica aplicada é transversal aos casos dos embalões e dos vidrões. Cada cenário foi testado 5 vezes, e em cada execução do algoritmo de otimização de rotas obtiveram-se três rotas. Posteriormente foi efetuada uma análise visual das rotas obtidas, utilizando gráficos de pontos como o exemplo na Figura 42 onde os papelões pertencentes à mesma rota foram assinalados com uma cor igual.

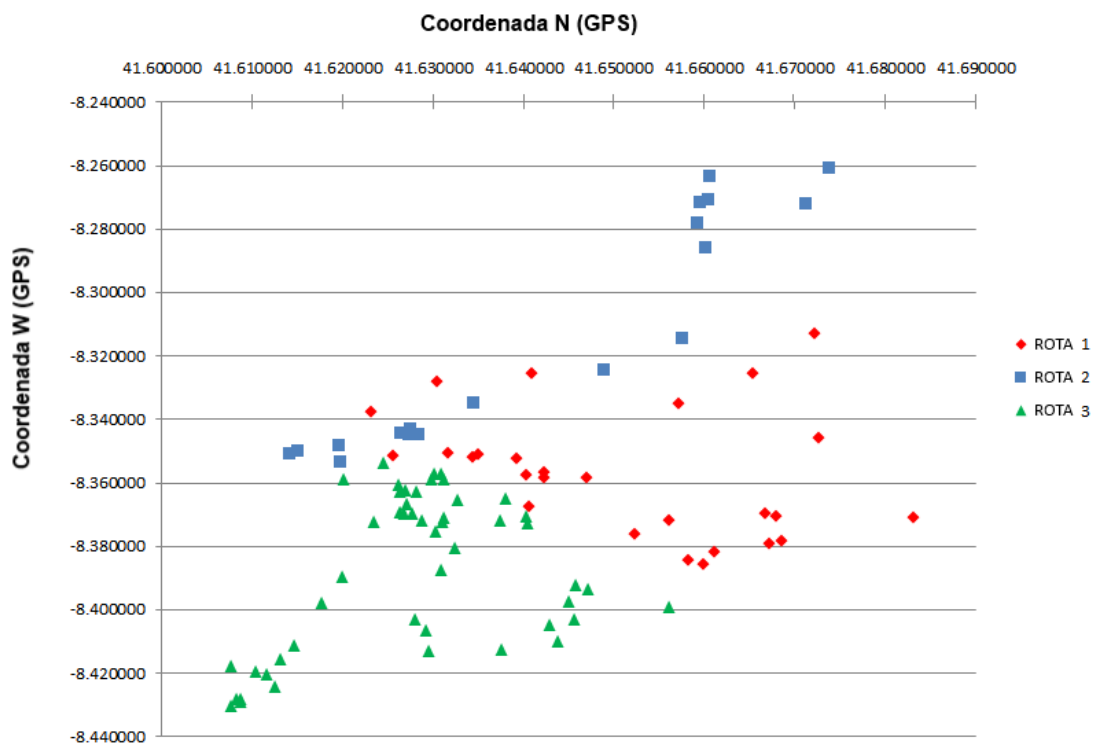


Figura 42- Exemplo de representação da localização de papelões de acordo com a rota a que foram atribuídos (cenário 1B – execução 5).

Com o primeiro cenário de teste, 1A, observou-se que as rotas determinadas representavam zonas bem definidas, ou *clusters*. Efetuou-se uma contagem das ocorrências de cada papelão em cada *cluster*. Uma vez que se realizaram cinco execuções de teste para cada cenário, assumiu-se que se um papelão fosse contabilizado pelo menos três vezes (em cinco possíveis) no mesmo *cluster*, então passaria a pertencer a esse *cluster*. Assim, para o cenário 1A, 77 papelões, de um total de 94, foram distribuídos por três *clusters*. No cenário 1B, em que se aplicou a função-objetivo de minimização de distância, foram distribuídos 91 papelões pelos três *clusters*, ficando apenas 3 sem atribuição. Observou-se que os *clusters* formados no cenário 1A coincidiram quase totalmente os *clusters* obtidos no cenário 1B, ou seja, quase todos os papelões dos *clusters* 1, 2 e 3 do cenário 1A estão incluídos respectivamente nos *clusters* 1, 2 e 3 do cenário 1B. O mesmo sucede com os restantes *clusters*.

Com os restantes cenários de teste, à medida que se foram aumentando as restrições ao modelo de otimização de rotas, observou-se uma consequente diminuição do número de papelões a ser incluídos nas rotas, e por consequência, os *clusters* formados passaram a conter um menor número de papelões associados. Na maioria dos cenários, observou-se que esses *clusters* de menor dimensão mantêm um “núcleo” de papelões que se mantêm constante, e desse núcleo fazem parte os contentores mais prioritários/urgentes que implicam uma frequência de recolha mais elevada. Estes contentores mais prioritários imputam a necessidade de recolhas mais frequentes e com um intervalo mais fixo entre elas, pois atrasos ou antecipações de um ou mais dias podem traduzir-se em perdas significativas na quantidade de resíduos que se pode obter aquando de uma visita a um desses papelões. Esta situação reforça a ideia de se efetuar a recolha destes papelões em dias fixos durante a semana, de acordo com o *cluster* a que pertencem (sempre que possível).

Após a análise dos resultados obtidos com os vários cenários de teste, verificou-se que os *clusters* do cenário 1B são os mais abrangentes, e englobam os *clusters* menores formados com as restantes experiências efetuadas. Assim, os *clusters* do cenário 1B irão constituir a base para o desenvolver a calendarização ou agendamento das recolhas de cada papelão. De forma a consolidar melhor os *clusters* determinados, efetuaram-se seis execuções de teste adicionais ao cenário 1B, perfazendo um total de onze execuções. O critério de atribuição de um papelão a um *cluster* foi alterado, passando a ser necessário um mínimo de seis ocorrências de um papelão num determinado *cluster* para que nele seja incluído. Após a retificação da distribuição dos papelões pelos *clusters*, estes sofreram alterações muito ligeiras, que pouco modificaram a constituição inicial, tendo-se mantido mais de 90% dos papelões nos mesmos *clusters*. De novo, 91 papelões ficaram alocados aos três *clusters*, tendo sobrado três papelões não alocados (IDs: X148, X153 e X126), uma vez que não atingiram o mínimo de seis ocorrências em um dos três *clusters*. Na Figura 43 pode-se observar a situação resultante dos *clusters* formados. No entanto, a definição final dos *clusters* não termina por aqui, pois além de haver três papelões sem alocação e que necessitam ser alocados a um dos *clusters* existentes, alguns dos papelões já distribuídos não se encontram associados ao *cluster* mais apropriado (ver detalhe na Figura 43), uma vez que estão localizados em plena área de um *cluster* que não daquele ao qual estão alocados. Após ponderação sobre a distribuição dos papelões não alocados e de outros que se consideraram mal alocados, obtiveram-se os *clusters* finais que estão representados na Figura 44. Os papelões pertencentes a cada um estão listados na Tabela 46.

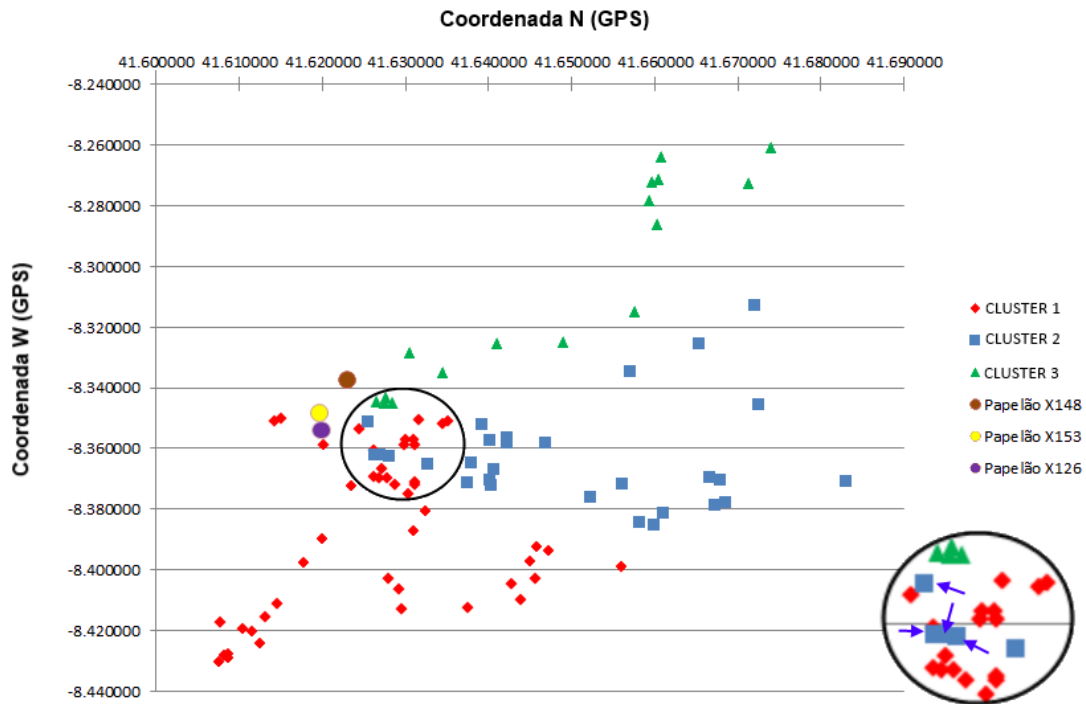


Figura 43 - Clusters obtidos após 11 execuções de teste ao cenário 1B.

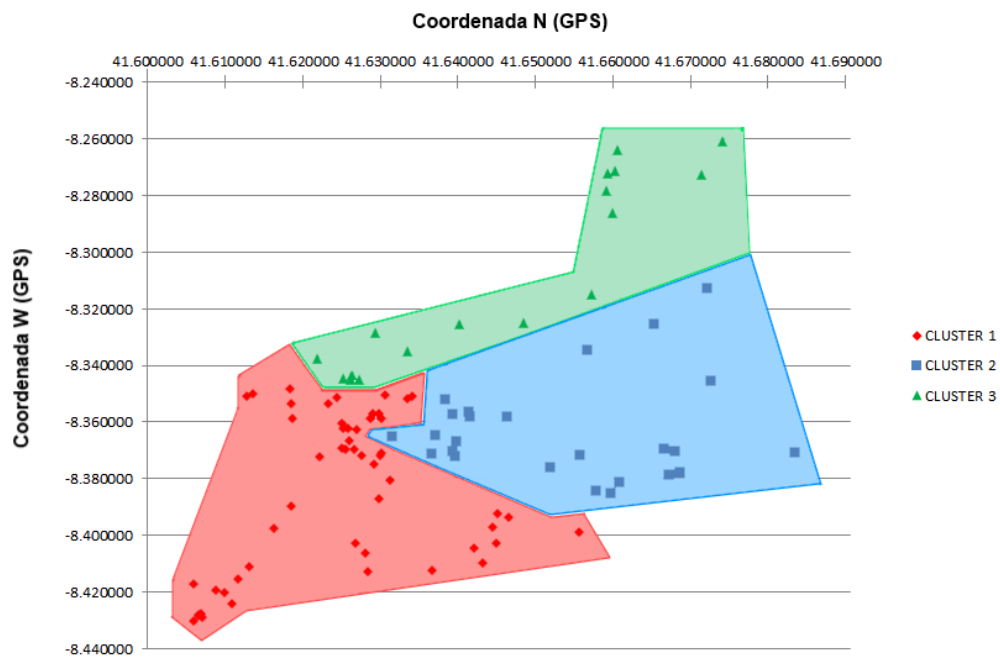


Figura 44 - Clusters finais obtidas após retificação.

Tabela 46 - Clusters finais com os respetivos papelões (códigos ID).

Cluster 1		Cluster 2	Cluster 3
X037	X081	X080	X038
X048	X087	X141	X026
X043	X052	X036	X094
X076	X200	X170	X145
X157	X136	X082	X132
X158	X169	X139	X021
X159	X133	X005	X146
X089	X127	X104	X138
X129	X128	X055	X148
X063	X086	X101	X098
X084	X161	X201	X149
X041	X046	X004	X147
X056	X070	X151	X137
X092	X163	X140	X024
X088	X085	X033	X077
X060	X197	X166	X029
X090	X130	X030	X134
X095	X131	X102	
X017	X096	X156	
X067	X069	X097	
X153	X126	X034	
X018	X010	X143	
X091	X040	X188	
X107	X042	X099	
X014	X155	X008	
X057	X079		

O processo de determinação de *clusters* foi também realizado para os embalões e vidrões do concelho de Amares. Os 90 embalões existentes encontram-se nos mesmos ecopontos que os papelões, e por essa razão os *clusters* formados são os mesmos. No caso dos vidrões existe um total de 95, em que 5 deles pertencem a ecopontos constituídos unicamente por vidrões. Os restantes 90 vidrões encontram-se junto de papelões, e portanto os *clusters* formados são muito semelhantes.

6.2.2 Agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores em ecopontos

A outra abordagem que se pretende explorar para efetuar o agendamento de rotas consiste na determinação de rotas de recolha de RED com base no ritmo de enchimento dos diferentes contentores de ecopontos. Nesta abordagem, o objetivo primordial é melhorar a eficiência da recolha, no sentido de se alcançar um rendimento superior com cada contentor aquando do respetivo esvaziamento. Mais especificamente pretende-se determinar um momento de recolha o mais próximo possível da data limite em que um contentor fica totalmente cheio, altura em que o seu esvaziamento é mais urgente. Deste modo maximiza-se a quantidade (ou volume) de resíduos recolhidos, e mantém-se elevado o valor da taxa entre a quantidade recolhida (q) e a distância percorrida numa rota (d). Este tipo de agendamento tem um carácter totalmente dinâmico, pois para cada concelho serão geradas diariamente rotas que são sempre diferentes e não se repetem ciclicamente, uma vez que tanto a frequência como a urgência de recolha irão determinar em grande parte se cada contentor de ecoponto deve ser ou não incluído nas rotas de cada dia.

A ideia de promover a recolha o mais próximo possível do nível máximo de enchimento dos contentores pode ser concretizada através da aplicação do modelo CTOPdTW para efetuar o agendamento das recolhas. Primeiramente é necessário escolher um período de tempo para o qual se pretende agendar rotas, e determinar que contentores recolher em cada dia desse período de tempo. De modo a demonstrar como o modelo CTOPdTW pode ser utilizado para o agendamento, considere-se que se pretende planejar as rotas de recolha de papelões para o mês de outubro de 2013 no concelho de Amares.

No concelho de Amares é aplicado o horário de trabalho correspondente ao circuito normal (C1 - Tabela 43), ou seja, são efetuadas recolhas apenas de segunda a sexta-feira e excluindo feriados. Esta regra condiciona o agendamento das rotas, pois de acordo com as frequências médias de recolha existem, por exemplo, contentores que devem ser idealmente recolhidos a cada três dias; o que faz com que a recolha seja antecipada ou atrasada pois não há recolhas ao sábado nem ao domingo. Para o exemplo de outubro de 2013, ocorre acumulação de resíduos nos ecopontos durante 31 dias, dos quais apenas 23 são dias úteis, ou seja, um total de 23 dias são elegíveis para agendamento de recolhas. Seguindo a hipótese de modelação baseada no CTOPdTW, e de modo a conseguir com uma só execução do algoritmo obter um planeamento completo para o mês inteiro, definiu-se que para cada dia de recolha seria alocado um veículo,

ou seja, a janela temporal de cada veículo teria a duração de um dia. Relativamente aos contentores, estes também possuem janelas temporais que indicam os períodos de tempo em que estão elegíveis para recolha (Tabela 47). Assim, considerando esta interpretação do modelo CTOPdTW, um veículo alocado, por exemplo, para o dia 10 de outubro, pode apenas recolher contentores que estejam ativos ou elegíveis para serem recolhidos nesse dia, ou seja, possuem uma janela temporal (JT) que traduz um período de tempo que inclui o dia 10 de outubro.

Tabela 47 - Especificação das janelas temporais dos veículos para o agendamento da recolha de resíduos.

Período de Planeamento - Outubro de 2013		Veículo - ID	JT abre (dia)	JT fecha (dia)
Dias da semana	Dias do Mês			
TER	1	1	1	1
QUA	2	2	2	2
QUI	3	3	3	3
SEX	4	4	4	4
SAB	5	-	-	-
DOM	6	-	-	-
SEG	7	5	5	5
TER	8	6	6	6
QUA	9	7	7	7
QUI	10	8	8	8
SEX	11	9	9	9
SAB	12	-	-	-
DOM	13	-	-	-
SEG	14	10	10	10
TER	15	11	11	11
QUA	16	12	12	12
QUI	17	13	13	13
SEX	18	14	14	14
SAB	19	-	-	-
DOM	20	-	-	-
SEG	21	15	15	15
TER	22	16	16	16
QUA	23	17	17	17
QUI	24	18	18	18
SEX	25	19	19	19
SAB	26	-	-	-
DOM	27	-	-	-
SEG	28	20	20	20
TER	29	21	21	21
QUA	30	22	22	22
QUI	31	23	23	23

Um fator importante para a definição de janelas temporais para os contentores é a frequência de recolha, isto é, a frequência com que é necessário esvaziar um contentor. Os valores de frequências de recolha foram obtidos usando os registos da Braval, onde constam o número de recolhas efetivas realizadas durante o ano de 2013 para cada contentor de cada ecoponto. Tomando como exemplo um papelão em Amares que foi recolhido 118 vezes num ano, a frequência média de recolha será o quociente entre o número de recolhas e o número de dias do ano, ou seja, $365/118$, o que perfaz 3,09 dias, ou aproximadamente 3 dias. Foi referido anteriormente que o número de recolhas é diferente em cada mês, e que existe uma ligeira sazonalidade em termos do ritmo de geração (acumulação) de resíduos nos contentores. Assim, aplicou-se o fator de correção mensal para ao mês de outubro, de modo a determinar frequências de recolha mais ajustadas.

Após consulta de registos da Braval foi obtida uma amostragem do estado de enchimento de papelões, embalões e vidrões recolhidos durante dois meses do ano de 2013 aquando das recolhas efetuadas. Para esta amostragem recorreu-se à consulta de registos da Braval, mais especificamente os relatórios de recolha individuais, onde entre outras informações específicas, consta uma lista dos contentores visitados durante uma rota, bem como o estado de enchimento destes, de acordo com a seguinte escala: vazio (0%), menos de meio (25%), meio cheio (50%), mais de meio (75%) e cheio (100%). Observou-se que os contentores foram apenas recolhidos em dois estados de enchimento: 1) mais de meio (75%); 2) cheio (100%). Constatou-se que no caso dos papelões, apenas 9% das vezes ocorreram recolhas em que o estado era mais de meio. Para os embalões tal situação ocorreu apenas 8% das vezes. Já com os vidrões verificou-se que ocorreu cerca de 13% das vezes. Globalmente pode-se assumir que cerca de 90% das vezes os contentores foram recolhidos cheios. Deste modo é aceitável considerar que a frequência de recolha indica o número de dias que um contentor demora a encher por completo e a manter-se cheio. Por exemplo, se um contentor tem uma frequência de 5 dias, isto indica que a cada 5 dias o contentor fica cheio. Assim, é possível determinar a quantidade média de resíduos em litros ou em metros cúbicos que se acumula por dia num contentor, bastando para isso utilizar o valor da sua capacidade. Em seguida apresenta-se uma lista com o significado de algumas variáveis usadas para referir quantidade de resíduos em diferentes momentos:

- Q_{i_i} - Quantidade inicial no contentor i no início do período de agendamento;
- Q_{a_i} - Quantidade atual no contentor i ;

- Q_{d_i} - Quantidade diária que se acumula no contentor i .

Para agendar as recolhas do mês de outubro foi necessário estabelecer o cenário inicial de teste, ou seja, determinar o estado de enchimento aproximado de cada papelão no primeiro dia do período de agendamento, ou seja, dia 1 de outubro de 2013. Pretende-se obter uma estimativa da quantidade inicial (Q_i) em cada papelão. Utilizando o registo histórico das recolhas efetuadas pela empresa Braval durante o ano de 2013, selecionaram-se os dados referentes aos meses de agosto e setembro. Utilizando o *software* Excel da Microsoft® foi possível determinar para cada papelão o número de dias que passaram desde a última recolha até ao dia 1 de outubro. Depois, usando os valores do ritmo de enchimento e da quantidade diária (Q_d) determinou-se a quantidade aproximada de resíduos em cada papelão para o referido dia (Q_i), bem como o respetivo nível de enchimento em percentagem segundo a convenção da Braval (0%, 25%, 50%, 75% e 100%).

O passo seguinte consistiu em efetuar uma projeção inicial (idealizada) dos períodos de recolha de cada contentor para o mês inteiro. Para cada papelão i foi-se acrescentando o valor da quantidade diária respetiva (Q_{d_i}) ao longo de 31 dias. No dia 1 de outubro a quantidade inicial em cada papelão i é igual a Q_{i_i} , e no dia seguinte (2 de outubro), a quantidade atual (Q_{a_i}) é igual a $Q_{i_i} + Q_{d_i}$, e assim em diante até que a quantidade atual (Q_a) no papelão atinja o valor máximo, ou seja, que a quantidade preencha a capacidade volumétrica do contentor. Quando tal situação sucede, assume-se que a recolha é feita nesse mesmo dia em que o papelão está completamente cheio (de acordo com a estimativa). Desta forma, no dia posterior a essa recolha, o valor de Q_a assume o valor de Q_d e reinicia-se o processo de enchimento diário com as sucessivas adições do valor de Q_d até se encher de novo o contentor. Um excerto da projeção da evolução das quantidades de resíduos ao longo do período de planeamento é apresentado na Tabela 48, onde *CAP* corresponde à capacidade em litros de resíduos em cada contentor. Na tabela constam apenas as quantidades de resíduos estimadas para o final de cada dia, e por isso não se observam valores nulos de quantidade após o enchimento total de um papelão e respetiva recolha projetada. Na Tabela 49 consta a projeção da evolução do estado de enchimento de cada contentor em termos percentuais ao longo dos dias do mês.

Tabela 48 - Excerto da projeção da evolução das quantidades acumuladas nos contentores ao longo dos dias.

PAPELÃO - ID	FREQUÊNCIA (recolha)	ÚLTIMA RECOLHA	CAP	Q_d	Q_i	Quantidades acumuladas em cada dia (Litros)							
						TER	QUA	QUI	SEX	SAB	DOM	SEG	
						1	2	3	4	5	6	7	
X096	23	13	2500	109	1417	→	1417	1526	1635	1744	1853	1962	2071
X037	3	1	3000	1000	1000	→	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000
X040	37	22	2500	68	1496	→	1496	1564	1632	1700	1768	1836	1904
X076	4	4	5000	1250	5000	→	5000	1250	2500	3750	5000	1250	2500
X038	4	1	2500	625	625	→	625	1250	1875	2500	625	1250	1875
X094	7	8	2500	357	2500	→	2500	357	714	1071	1428	1785	2142
X158	5	4	2500	500	2000	→	2000	2500	500	1000	1500	2000	2500
X081	10	6	5000	500	3000	→	3000	3500	4000	4500	5000	500	1000
X088	8	1	2500	313	313	→	313	626	939	1252	1565	1878	2191
X128	14	6	2500	179	1074	→	1074	1253	1432	1611	1790	1969	2148

Tabela 49 - Excerto da projeção do estado de enchimento dos contentores ao longo dos dias.

Papelão (código ID)	Estado de enchimento dos contentores por dias									
	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X096	56.68%	61.03%	65.38%	69.72%	74.07%	78.42%	82.77%	87.11%	91.46%	95.81%
X037	33.33%	66.67%	100.00%	33.33%	66.67%	100.00%	33.33%	66.67%	100.00%	33.33%
X040	59.84%	62.54%	65.25%	67.95%	70.65%	73.35%	76.06%	78.76%	81.46%	84.16%
X076	100.00%	25.00%	50.00%	75.00%	100.00%	25.00%	50.00%	75.00%	100.00%	25.00%
X038	25.00%	50.00%	75.00%	100.00%	25.00%	50.00%	75.00%	100.00%	25.00%	50.00%
X094	100.00%	14.29%	28.57%	42.86%	57.14%	71.43%	85.71%	100.00%	100.00%	14.29%
X158	80.00%	100.00%	20.00%	40.00%	60.00%	80.00%	100.00%	20.00%	40.00%	60.00%

Após o processo de determinação dos ciclos de enchimento dos papelões, segue-se a identificação das janelas temporais para cada papelão ao longo do mês. De acordo com a estratégia operacional da Braval, um contentor só deve ser recolhido quando se encontra com o nível de enchimento igual ou superior a 50%. Contudo, a abordagem que se pretende seguir promove a recolha dos contentores quando estes estiverem o mais próximo possível da data limite em que um ecoponto fica totalmente cheio. Após análise dos diferentes ritmos de enchimento, observou-se que existem papelões que enchem em 3 dias, assim, como existem outros papelões que enchem em 30 dias ou mais. Se todos os papelões forem recolhidos apenas nos dias em que ficam completamente cheios, implica que cada janela temporal irá compreender um período de tempo de exatamente um dia. Se por um lado esta medida se traduz teoricamente numa recolha mais eficiente e ideal, por outro lado impõe uma rigidez

excessiva ao retirar flexibilidade ao processo de agendamento, não permitindo que certos contentores possam ser recolhidos com atraso ou antecipação em relação à data ideal. No entanto, é necessário existir maior flexibilidade de modo a equilibrar picos de acumulação de resíduos com dias de menor acumulação. Com esta observação em mente, optou-se por classificar contentores, neste caso os papelões, como sendo de enchimento rápido ou lento, de acordo com a frequência de recolha de cada um. Designaram-se como rápidos todos os papelões cuja frequência de recolha é inferior a 10 dias. Papelões lentos são todos os outros cuja frequência de recolha é igual ou superior a 10 dias. Aos papelões rápidos foi imposta uma regra da recolha fixa nos dias em que ficam cheios. Já no caso dos papelões lentos, uma vez que encham mais lentamente, não se torna demasiado crítico se a sua recolha for antecipada ou até mesmo atrasada 1 ou 2 dias. Definiu-se que um atraso de 1 dia seria aplicado quando a frequência se encontra entre 10 e 20 dias, e quando é superior a 20 dias o valor do atraso ascende a 2 dias. Assim, as janelas temporais dos papelões rápidos têm duração de um dia, já as janelas temporais dos papelões lentos abrem quando a quantidade de resíduos acumulada é igual ou superior a 80%, e fecha quando fica a 100%, com atraso até dois dias no máximo. Ao aplicar estas regras de definição das janelas temporais obtém-se a projeção final das recolhas. Um excerto da projeção inicial obtida para o caso dos papelões encontra-se na Tabela 50, onde marcados com cor cinza escuro surgem os períodos de possível recolha para os contentores lentos, que correspondem a janelas temporais de dimensão superior a 1 dia. Com a cor cinza claro estão assinalados os dias de recolha obrigatória para os contentores rápidos, que correspondem a janelas temporais de dimensão igual a 1 dia.

Tabela 50 - Excerto da projeção inicial das recolhas para cada contentor.

Papelão - ID	FREQ	TER	QUA	QUI	SEX	SAB	DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SAB	DOM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X096	23							REC	REC	REC	REC	REC		
X037	3			REC			REC			REC			REC	
X040	37									REC	REC	REC	REC	REC
X076	4	REC				REC				REC				REC
X038	4				REC				REC				REC	
X094	7	REC							REC					
X158	5		REC					REC					REC	
X081	10			REC	REC	REC								REC
X088	8								REC					
X128	14							REC	REC	REC				

Contudo, um problema que surge nesta fase de definição das janelas temporais é o facto de que em Amares, à semelhança do que se passa nos restantes concelhos onde ocorre o circuito normal de recolha C1 (Tabela 43), não se efetua a recolha de resíduos aos sábados e domingos. Isto obriga a que se proceda a uma correção das janelas temporais para cada papelão, de modo a evitar que as aberturas e/ou fechos das janelas temporais coincidam com sábados ou domingos. Para os papelões lentos, esta correção não acarreta grandes dificuldades de aplicação, mas tal não sucede com os papelões rápidos, pois várias vezes é projetado o enchimento total em sábados ou domingos, o que torna impraticável a regra da recolha em dia obrigatório, e assim surgem situações que obrigam a antecipar ou atrasar a recolha desses papelões. Este tipo de cenário não é favorável no sentido em que, por exemplo, ao atrasar a recolha de um contentor com frequência 4 podem surgir três problemas: 1) perde-se a oportunidade de acumular mais resíduos no contentor, pois fica cheio; 2) resíduos começam a ser depositados fora do contentor, o que a nível estético é algo indesejável; 3) cidadãos passam a depositar resíduos noutro contentor que não papelão, ou num outro ecoponto, ou pior, depositam os RED como lixo comum. Quando se antecipa a recolha, o cenário não é tão grave, porém a capacidade do contentor é sub-aproveitada.

Dado que a recolha é impossível ao sábado e domingo, para os contentores rápidos cuja frequência varia entre 3 e 9 dias, estabeleceram-se sequências de dias para recolha que podem ser designadas por regras de agendamento, as quais constam nas Tabela 51 e 52 (onde FREQ significa frequência). Com estas regras procurou-se agendar as recolhas de modo a maximizar o rendimento em cada contentor aquando do momento de recolha.

Tabela 51 - Esquemas de recolha de contentores com enchimento rápido.

Frequência de Recolha	Esquema de Recolha - Sequência de dias da semana
3	2 ^a feira → 5 ^a feira
4	3 ^a feira → 6 ^a feira
5	6 ^a feira → 4 ^a feira - 2 ^a feira
6	6 ^a feira → 5 ^a feira → 4 ^a feira → 3 ^a feira → 2 ^a feira → 6 ^a feira
7	De 7 em 7 dias
8	De 7 em 7 dias
9	6 ^a feira → 2 ^a feira → 4 ^a feira (semana seguinte)

Tabela 52 - Esquemas de recolha de contentores com enchimento rápido (representação gráfica).

FREQ	Esquema de Recolha - Sequência de dias da semana																									
	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S
3																										
4																										
5																										
6																										
7	De 7 em 7 dias																									
8	De 7 em 7 dias																									
9																										

Após aplicar as regras de agendamento que foram apresentadas, obtém-se a projeção final dos períodos de recolha para cada contentor, ou seja, as janelas temporais. Um excerto dessa projeção está presente na Tabela 53.

Tabela 53 – Excerto da projeção final das janelas temporais para os papelões de Amareos.

Papelão - ID	FREQ	TER	QUA	QUI	SEX	SAB	DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SAB	DOM
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X096	23							REC	REC	REC	REC	REC		
X037	3			REC				→ REC			REC			
X040	37									REC	REC	REC		
X076	4	REC			REC ←				REC			REC ←		
X038	4				REC				REC			REC ←		
X094	7	REC							REC					
X158	5		REC					REC				REC ←		
X081	10			REC	REC									
X088	8								REC					
X128	14							REC	REC	REC	REC			

Uma vez obtida a projeção final das recolhas e determinadas as janelas temporais, segue-se o cálculo do valor estimado da quantidade de resíduos em cada papelão para cada janela temporal durante o período de agendamento. Como já foi referido, os papelões rápidos têm janelas temporais que compreendem um intervalo de tempo de apenas um dia, e deste modo o cálculo da quantidade esperada é fácil e direto. No entanto, para os papelões lentos não é tão fácil definir qual a quantidade prevista acumulada. Tal deve-se ao facto de as suas janelas temporais compreenderem períodos de mais que um dia, e o modelo CTOPdTW que foi desenvolvido não inclui a opção de prémios dinâmicos em função do tempo, o que se iria

traduzir em termos práticos em contentores com valor variável de quantidade de resíduos ao longo do intervalo de tempo das janelas temporais. Contudo, o modelo CTOPdTW desenvolvido não está preparado para lidar com pontos de prioridade dinâmicos em função do tempo, ou seja, que variam de acordo com o momento (dia) em que o respetivo contentor é recolhido. No entanto, essa hipótese de modelação permitiria contornar a necessidade de se efetuar uma correção das quantidades estimadas para recolher de acordo com o agendamento obtido usando apenas o CTOPdTW. Assim, para cada papelão lento foi determinado um valor médio de quantidade que corresponde a 90% da sua capacidade. Isto porque a janela temporal abre a partir dos 80% de enchimento e fecha quando o contentor fica cheio (100%), e por isso o valor médio assumido é 90%. Na Tabela 54 apresenta-se um excerto do resultado da estimativa das quantidades acumuladas em cada contentor para cada janela temporal.

Tabela 54 - Estimativa das quantidades acumuladas em cada contentor para cada janela temporal.

Papelão - ID	FREQ	CAP	Q_d	TER	QUA	QUI	SEX	SAB	DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X096	23	2500	109							2225	2225	2225	2225	2225
X037	3	3000	1000			3000				4000			3000	
X040	37	2500	68									2225	2225	2225
X076	4	5000	1250	5000			3750				5000			3750
X038	4	2500	625				2500				2500			1875
X094	7	2500	357	2500							2500			
X158	5	2500	500		2500					2500				2000
X081	10	5000	500			4650	4650							
X088	8	2500	313								2500			
X128	14	2500	179							2225	2225	2225	2225	

Antes de se poder aplicar o algoritmo construtivo desenvolvido para o encaminhamento de veículos segundo o modelo CTOPdTW, é necessário efetuar algumas modificações adicionais às janelas temporais para ser possível interpretar os valores de abertura e fecho das janelas. De modo a serem utilizados no algoritmo, os valores das janelas temporais são previamente convertidos de unidades de tempo para unidades de distância. Esta alteração deve-se ao facto de no algoritmo se utilizarem unicamente unidades de distância para contabilizar distâncias e tempo. Foi uma medida de simplificação adotada de modo a seguir os modelos TOP apresentados anteriormente, onde não se consideram restrições de tempo e de distância simultâneas. Assim, para converter unidades de tempo em unidades de distância é preciso considerar a velocidade média a que circulam os veículos da Braval. Após consulta dos registos

da Braval relativamente às distâncias percorridas por cada veículo em cada rota de recolha efetuada no concelho de Amares, determinou-se um valor de velocidade média seguindo as fórmulas apresentadas nas equações (39) e (40), onde \bar{v}_i é a velocidade média da rota i , d_i é a distância percorrida na rota i , t_i é o tempo que demorou a rota i , t_{rec_i} é o tempo despendido a recolher contentores durante a rota i . Na Equação (40), \bar{v} é a média de todas as velocidades médias calculadas para um conjunto R de rotas cujos dados foram obtidos com os registos da Braval, e no total foram utilizados valores de 282 rotas, portanto R é igual a 282. O valor obtido para \bar{v} foi de aproximadamente 35 km/h.

$$\bar{v}_i = \frac{d}{t_i - t_{rec_i}} \quad (39)$$

$$\bar{v} = \frac{d}{t_i - t_{rec_i}} \quad (40)$$

Após obtido valor de \bar{v} , pode-se então converter para quilómetros o intervalo de tempo representado em cada janela temporal. Uma vez que em Amares se aplica o circuito de recolha C1 (Tabela 43), existem 8 horas no turno de trabalho diário, o que corresponde a 280 km de distância se a conversão for feita com $\bar{v} = 35 \text{ km/h}$ ($8h \times 35 \text{ km/h} = 280 \text{ km}$). Deste modo, a janela temporal que representa o primeiro dia de recolha será o intervalo $[0, 280]$, para o segundo dia será $[280, 560]$, para o terceiro $[560, 840]$, e assim por diante. Assim, para um determinado contentor com uma janela temporal que vai do dia 2 ao dia 3 será apresentada como o intervalo $[280, 840]$, pois o valor de abertura corresponde ao início do dia 2, e o valor de fecho coincide com o final do dia 3. As janelas temporais para os contentores, nestes casos os papelões, são convertidas para unidades de distância. Exemplos dessa conversão constam na Tabela 55.

Tabela 55 - Exemplo de definição de janelas temporais para os contentores (papelões).

ID - Papelão	JT 1		JT 2		JT 3		JT 4		JT 5	
	Abre	Fecha	Abre	Fecha	Abre	Fecha	Abre	Fecha	Abre	Fecha
X096	1120	2520	5880	6440						
X037	560	840	1120	1400	1960	2240	2520	2800	3360	3640
X040	1680	3640								
X076	0	280	840	1120	1400	1680	2240	2520	2800	3080
X038	840	1120	1400	1680	2240	2520	2800	3080	3640	3920
X094	0	280	1400	1680	2800	3080	4200	4480	5600	5880
X158	280	560	1120	1400	2240	2520	3080	3360	3920	4200
X081	560	1120	2520	3080	4480	5320				
X088	1400	1680	3080	3360	4760	5040				
X128	1120	2240	3920	5040						

No entanto, em termos operacionais, o turno diário de trabalho é dividido em duas partes, ou sub-turnos, de 4 horas cada, pois existe um retorno obrigatório à Braval na hora de almoço. Assim, em termos práticos, um dia de trabalho é definido por duas janelas temporais com os intervalos [0h, 4h] e [4h, 8h], que convertendo em distância para o primeiro dia por exemplo, traduzem os intervalos [0, 140] e [140, 280]. Na Tabela 56 constam os valores das janelas temporais para o turno de trabalho diário, bem como para as divisões em sub-turnos, para o agendamento da recolha durante o mês de outubro de 2013 em Amares.

Tabela 56 - Exemplo de definição de janelas temporais para veículos.

Dia (mês)	Dia (semana)	Janela Temporal - JT	Veículo - ID	Turno Diário (8h)		Sub-Turno 1 (4h)		Sub-Turno 2 (4h)	
				Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
				JT - Abre	JT-Fecha	JT - Abre	JT - Fecha	JT - Abre	JT - Fecha
1	TER	1	1	0	280	0	140	140	280
2	QUA	2	2	280	560	280	420	420	560
3	QUI	3	3	560	840	560	700	700	840
4	SEX	4	4	840	1120	840	980	980	1120
7	SEG	5	5	1120	1400	1120	1260	1260	1400
8	TER	6	6	1400	1680	1400	1540	1540	1680
9	QUA	7	7	1680	1960	1680	1820	1820	1960
10	QUI	8	8	1960	2240	1960	2100	2100	2240
11	SEX	9	9	2240	2520	2240	2380	2380	2520
14	SEG	10	10	2520	2800	2520	2660	2660	2800
15	TER	11	11	2800	3080	2800	2940	2940	3080
16	QUA	12	12	3080	3360	3080	3220	3220	3360
17	QUI	13	13	3360	3640	3360	3500	3500	3640
18	SEX	14	14	3640	3920	3640	3780	3780	3920
21	SEG	15	15	3920	4200	3920	4060	4060	4200
22	TER	16	16	4200	4480	4200	4340	4340	4480
23	QUA	17	17	4480	4760	4480	4620	4620	4760
24	QUI	18	18	4760	5040	4760	4900	4900	5040
25	SEX	19	19	5040	5320	5040	5180	5180	5320
28	SEG	20	20	5320	5600	5320	5460	5460	5600
29	TER	21	21	5600	5880	5600	5740	5740	5880
30	QUA	22	22	5880	6160	5880	6020	6020	6160
31	QUI	23	23	6160	6440	6160	6300	6300	6440

Outra modificação necessária para permitir ao algoritmo processar as janelas temporais (JTs) de cada contentor consiste na distribuição dessas JTs por réplicas do contentor, isto é, se para um certo período de planeamento existem x janelas associadas a um contentor, serão geradas $x - 1$ réplicas, sendo atribuída ao contentor original a primeira janela temporal, e às réplicas são atribuídas as JTs restantes. Para um exemplo prático considere-se que um contentor tem 5 janelas temporais (ou recolhas previstas) para um período de um mês. Então, para além dos dados do contentor e da primeira janela temporal (JT1), serão passadas para o algoritmo quatro

réplicas desse contentor, cada um com uma janela temporal associada (JT2, JT3, JT4 e JT5). Deste modo, para efetuar o agendamento dos 94 papelões de Amares serão utilizados mais do que 94 vértices no modelo CTOPdTW para resolver o problema, ou seja, o número de vértices (contentores + réplicas) será igual ao total de janelas temporais (JTs) de todos os contentores. Um exemplo do processo de geração de réplicas é apresentado na Tabela 57. Para o período de planeamento considerado, o mês de outubro de 2013, foram determinadas 313 janelas temporais, e portanto serão processados 313 vértices pelo algoritmo. É em situações como esta que se confirma a necessidade de utilização de uma metaheurística ao invés de um método exato para resolver o problema de encaminhamento de veículos sob estudo, uma vez que mesmo os métodos exatos mais capazes só permitem resolver instâncias do problema com cerca de uma centena de vértices. [7] [19]

Tabela 57 - Exemplo do processo de determinação de réplicas de contentores (vértices).

Contentor - ID	Réplicas de Contentor									
	X096	X037	X040	X076	X038	X094	X158	X081	X088	X128
Nº de JTs	2	9	1	9	8	5	7	3	3	2
Original	X096	X037	X040	X076	X038	X094	X158	X081	X088	X128
Réplicas	X096	X037		X076	X038	X094	X158	X081	X088	X128
		X037		X076	X038	X094	X158	X081	X088	
		X037		X076	X038	X094	X158			
		X037		X076	X038	X094	X158			
		X037		X076	X038		X158			
		X037		X076	X038		X158			
		X037		X076	X038					
		X037		X076	X038					

O passo seguinte para determinar o agendamento das recolhas consiste na elaboração do ficheiro com os dados de entrada, *input*, para o algoritmo processar e produzir uma solução. Este *input* consiste num ficheiro de texto (.txt) onde constam os dados de uma instância CTOPdTW que se pretende resolver (Figura 45). Os dados que constituem a instância CTOPdTW são os seguintes:

- VERTICES: número de vértices (incluindo o local de depósito ou ponto de partida);
- VEHICLES: número de veículos;
- Capacidade dos veículos;
- MAX_CAPACITY: distância máxima MAX_DISTANCE;

- MAX_TIME: Tempo máximo;
- MIN_QUANTITY: quantidade mínima a recolher por rota;
- MIN_TOTAL_QUANTITY: quantidade mínima a recolher por solução;
- VEHICLES_TIME_WINDOWS: lista de janelas temporais dos veículos (disponibilidades);
- VERTICES_DATA: lista de vértices (réplicas de contentores), com as seguintes informações para cada um:
 - ID: código de identificação do contentor;
 - Ecop-ID: código de identificação do ecoponto a que pertencem;
 - coord-x e coord-y: coordenadas GPS do ecoponto;
 - Qa: quantidade acumulada de resíduos;
 - PP: pontos de prioridade (prémio);
 - d: duração da recolha do contentor;
 - TWo: abertura da janela temporal;
 - TWc: fecho da janela temporal;

```

VERTICES 314
VEHICLES 23
MAX_CAPACITY 25000
MAX_TIME 6440
MAX_DISTANCE 6440
MIN_QUANTITY 0
MIN_TOTAL_QUANTITY 0

VEHICLES_TIME_WINDOWS:
(0 280) (280 560) (560 840) (840 1120) (1120 1400) (1400 1680) (1680 1960) (1960 ...

VERTICES_DATA

```

ID	Ecop-ID	coord-X	coord-Y	Qa	PP	d	Two	TWc
0	0	41.58072	-8.31407	0	0	0	6440	
1	1	41.63511	-8.35112	2325	97	3.5	1120	2520
2	1	41.63511	-8.35112	2325	97	3.5	5880	6440
3	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	560	840
4	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	1120	1400
5	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	1960	2240
6	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	2520	2800
7	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	3360	3640
8	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	3920	4200
9	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	4760	5040
10	2	41.63172	-8.35055	3000	133	3.5	5320	5600

Figura 45 - Exemplo de ficheiro de instância CTOPdTW para *input* do algoritmo que gera rotas.

Em relação à duração das rotas, o tempo máximo disponível para executar cada rota não deve ser igual ao tempo disponível num turno de 4 horas. Tal deve-se ao facto de existir um momento dedicado à descarga de resíduos por parte dos camiões aquando do seu regresso à Braval no final de uma rota, ou quando o contentor de carga fica cheio durante uma rota. Segundo informação da Braval, a duração dessa descarga depende do número de camiões em fila de espera, e por isso pode variar entre 10 minutos e 20 minutos, incluindo o tempo de pesagem dos resíduos recolhidos. No entanto, o mais comum é a descarga demorar cerca de 10 minutos. Assume-se uma duração média de 10 minutos. A duração máxima de uma rota deverá ser de 4 horas menos 10 minutos, ou seja, 230 minutos.

Dado que neste exemplo de agendamento se considera somente a recolha de papelões, então, o tempo de recolha efetiva de um papelão (usando a grua) será de 2,5 minutos caso o ecoponto a que pertence seja de superfície, e de 3 minutos se o ecoponto for do tipo subterrâneo. Considerando que o tempo de *setup* de recolha é em média 30 segundos, então a duração total da recolha de um papelão será de 3 minutos para um papelão de superfície, e de 3,5 minutos para um papelão subterrâneo.

Para resolver a instância do problema de encaminhamento de veículos, também é necessário fornecer uma matriz de distâncias entre os ecopontos ao algoritmo de otimização de rotas. No algoritmo utiliza-se os códigos de identificação de ecoponto para identificar na matriz o valor de distância entre dois vértices da instância. Usando ferramentas incluídas na Google Maps API, foi possível obter distâncias reais entre os 99 ecopontos de Amares. Num problema real como a recolha de resíduos, a utilização de distâncias reais é imprescindível, pois por vezes há ocorrências de distâncias não simétricas entre dois pontos, ou seja, por vezes, ir do ecoponto A para o B é uma distância diferente de ir do ecoponto B para o A. Neste contexto, usar distâncias euclidianas entre pontos ou aplicar a fórmula *haversine* para obter distâncias conduziria a erros elevados ao determinar as distâncias percorridas nas rotas, principalmente devido à existência dos rios Cávado e Homem que delimitam o concelho, e por ser pequena a rede viária disponível.

Fases sequenciais de resolução

A resolução de uma instância CTOPdTW com o intuito de agendar rotas de recolha é composta por diferentes fases. Numa primeira fase (F1) espera-se que o algoritmo determine os papelões que serão idealmente recolhidos em cada dia do período de agendamento, obtendo-se um agendamento das recolhas em termos táticos. Para tal, aloca-se um veículo para cada um dos 23 dias determinados para a recolha, passando a janela temporal de cada veículo a

corresponder a um desses dias, contabilizando na instância um total de 23 veículos. Relaxando a restrição da capacidade máxima dos veículos, isto é, assumindo uma capacidade de carga infinita para veículos, os veículos passam a poder transportar numa só rota os resíduos de todos os papelões que lhe forem atribuídos para recolha pelo algoritmo de otimização, de acordo com as janelas temporais de cada papelão. Após resolver a instância, cada veículo representa um dia de recolha, e os contentores que lhe foram atribuídos são os que devem ser idealmente agendados para o dia a que o veículo está associado. Na Tabela 58 está disponível um excerto dos resultados obtidos em F1, onde cada janela temporal representa um dia diferente de recolha, e em cada dia estão listados os papelões que deveriam ser recolhidos. A última linha da tabela apresenta os valores das quantidades de resíduos previstas recolher em cada dia.

Tabela 58 - Pormenor dos resultados da fase de agendamento F1 para os papelões.

JANELA TEMPORAL	1	2	3	4	5	6	7
JT - Abertura	0	280	560	840	1120	1400	1680
JT - Fecho	280	560	840	1120	1400	1680	1960
PAPELÕES - código ID	X184	X301	X242	X257	X004	X251	X209
	X188	X296	X238	X232	X115	X180	X133
	X279	X208	X224	X218	X146	X045	X124
	X288	X173	X274	X262	X051	X063	X168
	X030	X176	X137	X268	X081	X104	X142
	X071	X035	X056	X090	X202	X160	X199
	X013	X309	X145	X100	X204	X015	X091
	X159	X060	X075	X167	X306	X001	X263
	X113	X096	X078	X114	X085	X155	X269
	X087	X261	X042	X123	X308	X023	X219
	X103		X003	X014	X067	X031	X233
	X229		X193	X022	X277	X281	X213
	X129		X108	X280	X240	X189	X048
	X154				X130		
	X250				X036		
Quantidade Total	42.800	24.125	39.425	34724	41242	34087	36.991

Após obter os resultados de F1, é necessário efetuar uma correção das quantidades previstas recolher em cada dia. Na simplificação efetuada para as janelas temporais dos papelões lentos, que incluem vários dias de possível recolha, assumiu-se que a quantidade acumulada de resíduos em qualquer um desses dias correspondia a 90% de enchimento, e ao executar a recolha para um dia específico, a quantidade que idealmente se prevê estar acumulada pode não coincidir com a quantidade assumida inicialmente. Assim, para cada papelão lento foi recalculada (ou corrigida) a quantidade de resíduos prevista recolher, tendo em consideração os dias que passaram entre uma recolha e a seguinte (Tabelas 59). Os valores corrigidos da

quantidade prevista recolher em cada papelão encontram-se a negrito. Na Tabela 60 encontram-se um excerto da correção das quantidades previstas recolher em cada dia.

Tabela 59 - Consolidação de valores para correção das quantidades de resíduos a recolher em cada papelão em F1.

ID - Papelão - Instância	ID - Papelão - Braval	Index - Papelão	ID - Veículo	Dia do Mês (recolha)	Quantidade Prevista	Quantidade Prevista Corrigida
...
250	X153	73	1	1	2250	2500
301	X098	88	2	2	2000	2000
296	X024	86	2	2	2500	2500
208	X132	58	2	2	2500	2500
173	X149	48	2	2	2225	2500
176	X014	49	2	2	2500	2500
35	X158	7	2	2	2500	2500
309	X141	93	2	2	2500	2500
60	X087	17	2	2	2250	2250
96	X091	30	2	2	2390	2500
261	X126	77	2	2	2158	2158
242	X136	68	3	3	2000	2000
238	X069	66	3	3	2250	2304
224	X067	63	3	3	5000	5000
274	X127	80	3	3	2080	2080
137	X095	40	3	3	2250	2000
56	X082	15	3	3	4170	4170
...

Tabela 60 - Correção das quantidades diárias previstas recolher em F1.

ID - Veículo	Dia de Recolha	Quantidade Diária (m ³)	
		Prevista	Prevista Corrigida
1	1	42.800	43.500
2	2	24.125	23.908
3	3	39.425	37.804
4	4	34.724	34.649
5	5	41.242	41.921
6	6	34.087	33.942
7	7	36.991	37.146
8	8	29.516	28.316
9	9	34.437	34.498
10	10	55.424	56.999
...

Após a correção das quantidades, pode-se avançar com a segunda fase do agendamento das recolhas, a qual se passa a designar por F2. Em F2 pretende-se efetuar a alocação específica de

veículos a cada dia de recolha, conforme as quantidades previstas recolher. A execução de F2 assenta na aplicação do modelo CTOPdTW, passando a restrição de capacidade dos veículos a estar ativa. As quantidades que foram previstas recolher após executar F1 servem de base para o dimensionamento do contentor de carga do camião que irá executar a recolha em cada dia.

Na secção 0 apresentaram-se dados sobre os veículos da Braval e as diferentes possibilidades para cada um ao utilizar diferentes contentores de carga. Com base em dados fornecidos pela Braval sobre rotas de recolha efetuadas em 2013, determinou-se que o veículo 10 foi o mais utilizado em Amares durante esse ano. Este veículo só consegue utilizar contentores de carga com capacidade de $15 m^3$. Além disso, este veículo possui um compactador fixo, e dado que o tipo de resíduos a recolher é papel/cartão, a capacidade volumétrica de carga pode aumentar até mais 30%. Assim, a capacidade máxima a considerar é de $19.5 m^3$. Para a execução de F2, assume-se que será alocado o veículo 10 para cada um dos 23 dias de recolha em Amares.

Uma vez estabelecida a capacidade de carga do veículo, contabilizou-se o número de vezes que o veículo 10 seria utilizado para transportar a quantidade prevista para cada dia de acordo com F1. Por exemplo, se para um determinado dia está prevista a recolha de uma quantidade total de $50 m^3$ de resíduos, então o contentor de carga de $19.5 m^3$ do veículo 10 teria de ser utilizado três vezes durante o dia de trabalho (turno de 8h) para transportar todos os resíduos para o depósito na Braval ($3 \times 19.5 = 58.5 m^3 > 50 m^3$). Deste modo, o número de utilizações de um contentor de carga traduz o número de retornos necessários efetuar durante o turno de trabalho, ou seja, com o exemplo da recolha de $50 m^3$ de resíduos, as três utilizações implicam três retornos para descarga.

Para executar F2 seguindo a estrutura do algoritmo de encaminhamento de veículos, e de modo a ser aplicado o modelo CTOPdTW, foi necessário adaptar o conceito de cálculo do número de retornos previstos para cada veículo com base no número de utilizações de contentor de carga. Assim, para simular os retornos, introduziram-se réplicas dos veículos, uma réplica por cada retorno extra, isto é, se um veículo precisa de três retornos para recolher a quantidade prevista para um determinado dia, então serão introduzidos no ficheiro da instância CTOPdTW três veículos com a mesma capacidade e que atuam durante a janela temporal correspondente a esse dia de recolha, ou seja, o tempo do turno de trabalho diário (8 horas). No entanto, foi referido anteriormente que o turno diário do circuito normal de recolha (Tabela 43) está dividido em duas partes de 4 horas (sub-turnos), e existe um retorno obrigatório à Braval após o primeiro

sub-turno. Caso a quantidade a recolher num dia implique dois retornos, e se a duração das recolhas de contentores e descargas na Braval não for superior a 4 horas, então para esse dia são contabilizadas duas réplicas do veículo que foi alocado, e as janelas temporais das réplicas correspondem ao intervalo de tempo de um mesmo sub-turno. Se as recolhas e descargas estão previstas demorar mais do que 4 horas, então a uma réplica do veículo é atribuída a janela temporal que compreende o primeiro sub-turno de 4 horas, e à outra réplica associa-se a janela temporal do segundo sub-turno.

Quando em F1 se prevê que serão necessários três retornos, então ao primeiro sub-turno serão associados duas réplicas do veículo, e uma réplica ao segundo sub-turno. Se forem necessários quatro retornos, então serão associadas duas réplicas a cada sub-turno. Estas situações de retorno extra durante um sub-turno podem gerar um problema em relação à divisão do tempo disponível (4 horas) pelas réplicas do veículo. Para o algoritmo que gera rotas, assume-se que as réplicas possuem 4 horas disponíveis para realizar recolha e descarga de resíduos. Durante a construção das rotas, sempre que um contentor é adicionado à rota de uma das réplicas, o algoritmo verifica se a soma da duração rotas é igual ou inferior à duração do sub-turno (4 horas), incluindo as respetivas descargas na Braval.

Para se executar F2, foram exploradas duas abordagens, as quais se designam daqui em diante por subfases F2-A e F2-B. A primeira, F2-A, consiste em considerar uma frota homogénea para determinar as rotas do período de planeamento escolhido, isto é, em cada dia de recolha o contentor de carga do camião terá sempre a mesma capacidade de carga. Na abordagem F2-B, considera-se a aplicação de uma frota heterogénea, no sentido em que a capacidade de carga do veículo se adapta à quantidade de resíduos a recolher, e podem-se utilizar veículos diferentes durante o mesmo dia de recolha e no mesmo concelho ou zona de recolha.

Agendamento considerando frota homogénea

A subfase F2-A é executada em duas etapas: F2-A1 e F2-A2. Em F2-A1 efetua-se uma projeção mais reservada do número de réplicas (retornos) necessárias por dia de recolha, isto é, o número de recolhas para um determinado dia corresponde ao valor resultante da divisão entre a quantidade prevista recolher e a capacidade do veículo, que é arredondado para o valor inteiro seguinte se o resultado não for um número inteiro. Por exemplo, se a quantidade a recolher é 50 m^3 , ao dividir por 19,5 m^3 de capacidade do veículo obtém-se aproximadamente o valor 2,56, que arredondado para o número inteiro seguinte é 3, ou seja, são necessários 3 retornos do veículos (ou réplicas) para recolher a quantidade total de resíduos.

No caso da subfase F2-A2, o foco passa por explorar possibilidades de minimizar o número de retornos em dias cuja quantidade prevista recolher esteja ligeiramente acima de um valor múltiplo da capacidade do veículo. Assumiu-se que se a quantidade (Q) a recolher num dia for até 10% a mais do que o valor múltiplo (M) da capacidade do veículo (C) imediatamente antes de Q , então o número de retornos/réplicas seria igual ao valor do multiplicador (ou coeficiente) n , em que $M = n \times C$, e $M \leq Q$. Por exemplo, se num dia a quantidade for de 40 m^3 , à partida seriam necessários 3 retornos, dado que $40 \text{ m}^3 \div 19.5 \text{ m}^3 \cong 2.05 \geq 2 \rightarrow 3$. Uma vez que o múltiplo anterior (M) é 39 m^3 , e a quantidade a recolher é apenas 2.56% superior a M , então, nesta situação atribui-se apenas duas réplicas do veículo para a efetuar a recolha. Os contentores que não podem ser recolhidos no dia inicialmente programado em F1 serão posteriormente distribuídos por outros dias por ação do algoritmo de construção de rotas. Em F2-A2, o objetivo fundamental consiste em poupar o máximo de retornos extra à Braval durante os sub-turnos. Considera-se F2-A2 um refinamento do agendamento obtido com F2-A1. Na Tabela 61 apresenta-se um exemplo de determinação do número de retornos/réplicas nas etapas de agendamento F2-A1 e F2-A2 para os primeiros 10 dias. No dia 5 de recolha, a quantidade de resíduos prevista recolher está próxima de um múltiplo da capacidade do veículo. A diferença é de 7.44% em relação ao múltiplo de 19.5 m^3 (39 m^3), e portanto para F2-A2 propõem-se apenas dois retornos ao invés de três projetados para F2-A1.

Tabela 61 - Determinação do número de retornos por dia de recolha para as etapas de agendamento F2-A1 e F2-A2.

		Retornos necessários por dia com réplicas de veículo com 19.5 m^3										
Dia de Recolha		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Quantidade (m3)		43.5	23.9	27.8	34.6	41.9	33.9	37.1	28.3	56.9	34.4	
Fase de Agendamento	F2-A1	3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	
							↓					
	F2-A2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	

Agendamento considerando frota heterogénea

Na subfase F2-B explora-se a aplicação de uma frota heterogénea para efetuar o agendamento de recolhas, e pretende-se adaptar a capacidade de carga do veículo conforme a quantidade prevista recolher após executar F1. Uma vez que o veículo 10 só consegue acoplar

contentores de carga com capacidade $15 m^3$, então para este exemplo de agendamento da recolha de papelões com frota heterogénea, considera-se a utilização do veículo 6 da frota da Braval, visto que este pode acoplar contentores de carga com diferentes capacidades: $16 m^3$, $17 m^3$, $20 m^3$ e $25 m^3$, que por aplicação do sistema compactador correspondem respectivamente a capacidades aproximadas de $21 m^3$, $22 m^3$, $26 m^3$ e $32 m^3$. A subfase F2-B consiste em duas etapas: F2-B1 e F2-B2. Na execução de F2-B1, o objetivo passa por definir qual a capacidade do contentor de carga do camião que melhor se adequa à quantidade a recolher em cada dia. Para definir a capacidade de carga adequada é necessário calcular o número de retornos com cada contentor de carga. Para tal divide-se a quantidade a recolher num dia por cada uma das capacidades dos contentores que o veículo pode utilizar, e arredonda-se para o valor inteiro seguinte (excepto se for valor inteiro). O tipo de contentor de carga que permitir menos retornos para descarga na Braval constitui a melhor opção para a recolha desse dia. No caso de haver mais do que um tipo contentor com o valor mínimo de retornos, a escolha recai no tipo de contentor com mais unidades disponíveis (consultar Tabela 40). Não se considera a possibilidade de usar combinações de diferentes contentores de carga para um mesmo veículo durante um turno ou sub-turno. Essa situação, apesar de permitir um melhor ajuste, implica um esforço adicional para trocar o contentor de carga de um veículo entre retornos ao local de partida e descarga. A empresa Braval corrobora com a ideia de que esta situação não se torna prática no dia-a-dia durante os turnos de recolha.

Uma vez escolhido o contentor de carga, para cada dia, o algoritmo pode executar a etapa F2-B1 para obter as rotas para o período de planeamento. Contudo, o planeamento obtido em F2-B1 pode ser melhorado em F2-B2, onde o objetivo passa por reduzir o número de retornos definidos em F2-B1. Para tal aplica-se a mesma regra que em F2-A2. Nas Tabelas 62 e 64 apresentam-se o número de retornos/réplicas para os primeiros 10 dias para as etapas F2-B1 e F2-B2. Na Tabela 62 observa-se que a utilização do contentor de $32 m^3$ é a opção que se traduz em menos retornos, contudo o tipo de contentor com mais unidades disponíveis é o de capacidade $26 m^3$, e será esta a opção a escolher sempre que num dia igualar o número de retornos que o contentor de $32 m^3$, como se pode observar na Tabela 63. Após a escolha dos tipos de contentor para cada dia, o algoritmo executa a etapa F2-B1.

Tabela 62 – Comparação do número de retornos com os diferentes tipos de contentor na etapa F2-B1.

		Retornos necessários por dia										Total
Dia de Recolha		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Quantidade (m^3)		43.5	23.9	27.8	34.6	41.9	33.9	37.1	28.3	56.9	34.4	
Contentor (m^3)	21	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	22
	22	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	21
	26	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	20
	32	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	17

Tabela 63 – Capacidade do contentor a escolher para cada dia na etapa F2-B1.

		Capacidade do contentor de carga para cada dia									
Dia de Recolha		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade (m^3)		43.5	23.9	27.8	34.6	41.9	33.9	37.1	28.3	56.9	34.4
Contentor (m^3)		26	26	32	26	26	26	26	32	32	26

Tabela 64 - Comparação do número de retornos com os diferentes tipos de contentor na etapa F2-B2.

		Retornos necessários por dia										Total
Dia de Recolha		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Quantidade (m^3)		43.5	23.9	27.8	34.6	41.9	33.9	37.1	28.3	56.9	34.4	
Contentor (m^3)	26	2	1	1	2	2	2	2	1	2	2	17
	32	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	14

Na Tabela 64 apresentam-se o número de retornos obtidos com cada tipo de contentor determinados na etapa F2-B2, onde apenas se consideram os dois tipos mais vantajosos de contentores para este exemplo de agendamento (26 e 32 m^3). É possível observar que o total de retornos foi reduzido para os dois tipos de contentor, comparando com F2-B1. Na Tabela 65 apresentam-se as escolhas finais para executar a etapa F2-B2.

Tabela 65 - Capacidade do contentor escolhida para cada dia na etapa F2-B2.

		Capacidade do contentor de carga para cada dia									
Dia de Recolha		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade (m^3)		43.5	23.9	27.8	34.6	41.9	33.9	37.1	28.3	56.9	34.4
Contentor (m^3)		26	26	26	32	26	32	26	26	26	32

A abordagem para agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores em ecopontos foi expandida e estruturada em diferentes fases e etapas. De modo a

facilitar a assimilação dos vários elementos desenvolvidos nesta abordagem, apresenta-se na Figura 46 uma esquia que resume as várias fases e etapas.

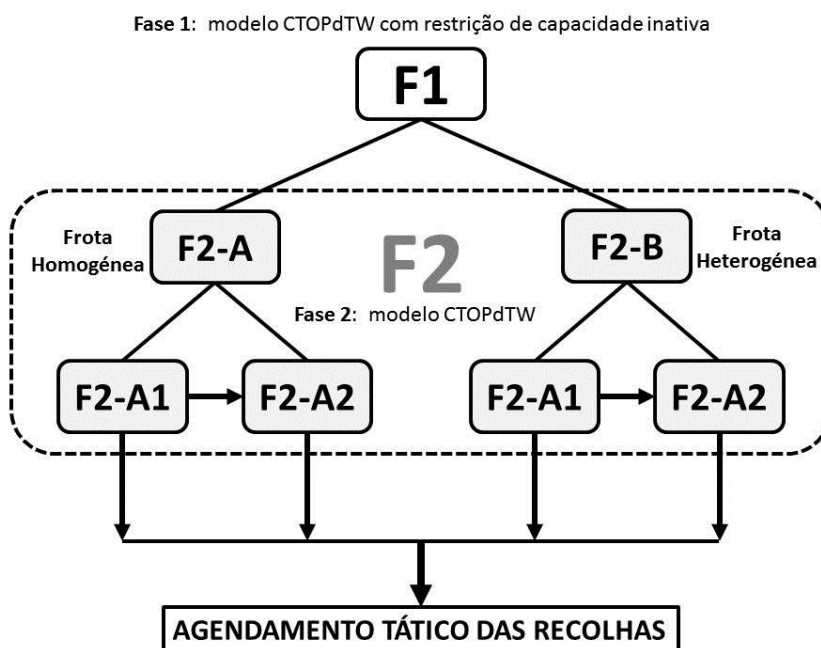


Figura 46 – Fases e etapas do agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores.

O conceito do agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores em ecopontos foi testado de modo a avaliar em pormenor o desempenho obtido com as abordagens de frota homogénea e heterogénea, com o objetivo final de identificar a que oferece as melhores soluções para a recolha de resíduos, e determinar se são concretizáveis em termos operacionais. Na secção seguinte serão apresentadas todas as experiências executadas no âmbito da otimização do encaminhamento de veículos para a recolha de resíduos de embalagens domésticas em situações reais. Os resultados obtidos serão comparados com o desempenho da empresa Braval.

6.3 Avaliação do desempenho em situações reais de agendamento de rotas de recolha

Anteriormente neste capítulo foram apresentadas duas abordagens diferentes para se efetuar o agendamento das rotas de recolha de RED, tendo como base o caso de estudo da empresa Braval. Contudo, apenas será testada a abordagem de agendamento de recolhas com base no ritmo de enchimento de contentores em ecopontos, pois o estudo do agrupamento de ecopontos

em rotas com base na análise de aglomerados (*clusters*) não carece deste tipo de validação. Os resultados obtidos com a abordagem de agendamento escolhida para teste serão comparados em termos de desempenho com a estratégia de recolha atualmente aplicada pela Braval. Para efeitos de avaliação do desempenho, será simulado um período de recolhas de 31 dias, correspondente ao mês de outubro de 2013. Com estes testes e simulação de situações reais de recolha de RED pretende-se validar se o método de agendamento permite alcançar melhorias na eficiência das rotas de recolha. Em termos de melhoria da eficiência, o objetivo passa pela diminuição dos custos associados à execução das rotas, principalmente as distâncias percorridas pelos veículos, as quais se espera que sejam menores perante a aplicação do método de agendamento de recolhas proposto, no qual se ponderam diversos fatores importantes para o desempenho da recolha de resíduos.

6.3.1 Considerações prévias

No âmbito da avaliação do desempenho das ferramentas desenvolvidas em situações reais da recolha de RED existem considerações prévias que devem ser retidas. Uma dessas considerações relaciona-se com o nível de compactação dos resíduos no interior dos contentores de ecopontos, que em conjunto com a ação de compactação dos resíduos a bordo dos veículos, tem influência na taxa de ocupação dos contentores de carga dos veículos. Tanto os resíduos depositados nos papelões como nos embalões encontram-se pouco ou nada compactados, ao invés do que sucede com os vidrões, uma vez que as embalagens de vidro se quebram em vários pedaços menores assim que são depositadas, e os resíduos ficam de tal forma compactados que quando um vidrão fica cheio, a quantidade de resíduos ocupa uma percentagem muito elevada da capacidade volumétrica do vidrão. Segundo informação da Braval, a baixa compactação dos resíduos de papel e embalagens faz com que apenas cerca de 45% do conteúdo dos papelões e embalões seja efetivamente ocupado por resíduos, sendo os restantes 55% apenas ar, mesmo quando os contentores estão supostamente cheios. Na Figura 47 apresenta-se o esquema de um contentor que se encontra aparentemente cheio mas que na realidade não está, pois os resíduos encontram-se pouco compactados e uma grande parte do espaço é apenas ar. Além disso, os resíduos estão dispostos de uma forma que não permite um aproveitamento eficiente da capacidade volumétrica do contentor, acabando por ocorrer o fenómeno designado por “falso cheio”. Ao serem descarregados para o camião de recolha, os resíduos vão ocupar menos espaço que o previsto, pois acabam por ficar melhor dispostos em

camadas, sem haver ar entre eles. Idealmente, quando um contentor fica cheio, a quantidade de resíduos deveria ocupar um volume muito próximo da capacidade máxima do contentor.

É importante adequar a capacidade de carga de um veículo que recolhe papel ou embalagens à quantidade “real” (Q_{real}) de resíduos prevista recolher em cada dia. Determinar o valor de Q_{real} passa por efetuar uma correção ao valor da quantidade prevista (Q_p). De acordo com a Equação (41), o valor de Q_{real} é dado pelo valor de Q_p multiplicado pelo fator de remoção de ar (F_r), e também pelo fator de compactação (F_c) caso o veículo possua compactador a bordo. O valor de F_c é de 0.7, pois corresponde a uma compactação máxima da quantidade de resíduos de 30%.

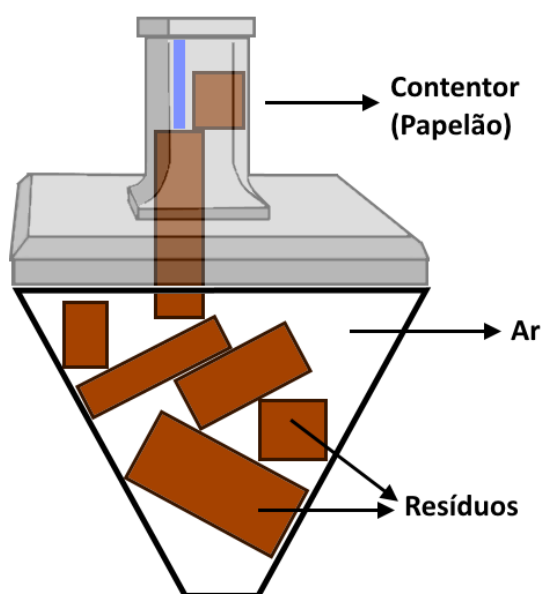


Figura 47 - Contentor com resíduos pouco compactados que provocam o fenómeno de “falso cheio”.

$$Q_{real} = Q_p \times F_r \times F_c \quad (41)$$

Seguindo a indicação dada pela Braval, o valor de F_d deve à partida corresponder a 0.45, uma vez que apenas 45% de resíduos se encontram efetivamente a ocupar espaço nos papelões e embalões. De modo a confirmar este valor para F_d consultaram-se dados relativos a recolhas de papel e embalagens feitas em Amares durante o ano de 2013. Segundo os registos, o veículo 10 foi o mais frequentemente utilizado para recolher resíduos de papelões e embalões em Amares, tendo realizado 221 rotas de recolha. Este veículo apenas pode utilizar contentores de carga de 15 m^3 , e nos registos das 221 rotas foram identificadas várias situações em que a quantidade nominal (Q_n) de resíduos recolhidos numa rota excedia amplamente a capacidade

de carga do veículo. Assim, conclui-se que o valor de F_d deve ser mais baixo do que 0.45 que inicialmente foram estimados pela Braval. Para determinar o valor de F_r foi necessário determinar o valor de Q_n para cada uma das 221 rotas efetuadas com o veículo 10 seguindo a Equação (42), onde P e E correspondem respetivamente ao número de papelões e embalões recolhidos numa rota, e V_P e V_E traduzem respetivamente o volume médio de resíduos estimado recolher em cada papelão e embalão.

$$Q_n = P \times V_P + E \times V_E \quad (42)$$

Para determinar os valores de V_P e V_E efetuou-se primeiro uma contagem do número de vezes que cada papelão e embalão de Amares foi visitado e recolhido durante 2013. Sabendo a capacidade de cada papelão e embalão recolhido foi possível identificar o número de vezes que se recolheram ecopontos com capacidade de $2,5 m^3$, $3 m^3$ e $5 m^3$. Na Tabela 66 apresenta-se a proporção média por rota para cada capacidade de contentor, ou seja, a percentagem de ecopontos de $2,5 m^3$, $3 m^3$ e $5 m^3$ que são recolhidos em média por rota. No entanto, além dessas proporções médias, deve-se contabilizar o estado de enchimento dos ecopontos aquando da sua recolha. De acordo com a amostragem referida na secção 6.2.2, os papelões são recolhidos em média 91% das vezes cheios (100%), e 9% em estado mais de meio cheio (cerca de 75% de enchimento). Para o caso dos embalões, estes são recolhidos cheios 92% das vezes, e meio cheios 8% das vezes. Com base nas proporções médias para papelões (Equação (43)) e embalões (Equação (44)), e no estado de enchimento do contentores foi possível determinar os valores de V_P e V_E de acordo com as Equações (45) e (46).

Tabela 66 – Proporção média para cada tipo de capacidade de contentor recolhido por rota.

Capacidade do contentor	PAPELÕES	EMBALÕES
$2.5 m^3$	72.9 %	73.5 %
$3 m^3$	16.6 %	16.2 %
$5 m^3$	10.5 %	10.3 %

$$P_P = 72.9\% \times 2m^3 + 16.6\% \times 3m^3 + 10.5 \times 5m^3 \quad (43)$$

$$P_E = 72.9\% \times 2m^3 + 16.6\% \times 3m^3 + 10.5 \times 5m^3 \quad (44)$$

$$V_P = (P_P \times 91\% \times 100\%) + (P_P \times 9\% \times 75\%) \quad (45)$$

$$V_E = (P_E \times 92\% \times 100\%) + (P_E \times 8\% \times 75\%) \quad (46)$$

Após determinar os valores de Q_n para cada das 221 rotas do registo acedido, identificou-se que o valor mais elevado foi de 175.24 m^3 . Esta foi a maior quantidade nominal a ser transportada pelo veículo 10. Apesar de não se saber se vinha completamente cheio nesse momento, isto é, se ocupava totalmente o contentor de carga, estabeleceu-se que 175 m^3 ocupam efetivamente um volume de 15 m^3 após compactação de 30%, pois o veículo 10 possui compactador. No entanto, considerando o efeito da compactação no veículo (F_c), a quantidade que transportada foi de $15 \text{ m}^3 \div 0.7$, o que perfaz um total de 21.42 m^3 de resíduos. Por fim pode-se obter o valor de F_r dividindo 21.42 m^3 por 175.24 m^3 , cujo resultado é 0.1223. Pode-se afirmar que a quantidade “real” (Q_{real}) de resíduos num papelão ou embalão é apenas 12.23 % da quantidade nominal (Q_n). Para os testes de agendamento optou-se por utilizar o valor 0.15 para o fator de remoção de ar (F_r).

Uma vez determinado o valor do fator de remoção de ar, foi possível corrigir as quantidades projetadas para as recolhas. Posteriormente procedeu-se à realização dos testes de agendamento para os diferentes tipos de resíduos de papelões e embalões nos modos de recolha mono-produto e multi-produto. Os resultados destes testes serão apresentados nas subsecções seguintes.

As informações sobre a capacidade dos veículos escolhidos irão constar nas instâncias CTOPdTW desenvolvidas para efetuar o agendamento das recolhas em Amares para o mês de outubro de 2013. Contudo, além da capacidade volumétrica do contentor de carga de um veículo, no caso da recolha de vidro é ainda mais importante considerar a capacidade de carga em termos de peso máximo que um veículo pode transportar, pois a densidade do vidro é muito mais elevada que a do papel e das embalagens, e a limitação de capacidade mais determinante é o peso total dos resíduos recolhidos, e não tanto o volume que ocupam.

A recolha realizada pela empresa Braval é efetuada de duas formas: durante o turno do circuito diurno (C1) recolha multi-produto de papel e embalagens, e recolha separada de vidro (mono-produto); durante o ciclo noturno (C2), a recolha é totalmente do tipo mono-produto, isto

é, cada caminhão apenas recolhe um tipo de resíduos. As razões para executar esta estratégia de recolha estão relacionadas com os custos associados e com a gestão de recursos.

O período de planeamento escolhido (outubro de 2013) coincide com uma altura em que a Braval ainda não aplicava a regra de retorno obrigatório após o primeiro sub-turno. Anteriormente, os condutores dos veículos passavam a hora de almoço na zona onde estivessem a recolher resíduos, e podiam retomar no segundo sub-turno a rota que estavam a executar. Além disso, segundo informações da Braval, é pouco frequente existirem situações de retornos extra para descarga durante um sub-turno de 4 horas. A capacidade de carga do veículo é quase sempre suficiente para recolher os contentores previstos visitar em cada dia. No entanto, a nossa metodologia desenvolvida para este problema está preparada para lidar com situações de retornos intercalares obrigatórios, facultativos ou não admitidos.

A recolha de resíduos depositados em vidrões implica que se tenha em consideração a capacidade de carga dos veículos em termos de peso máximo que podem transportar. Para tal, é preciso obter uma estimativa do peso dos resíduos a recolher em cada vidrão cheio. Com base num registo da Braval contendo dados sobre 47 rotas de recolha efetuadas em 2013, foi possível desenvolver um modelo de regressão linear para estimar o peso dos resíduos que se recolhem numa rota. O modelo de regressão desenvolvido para prever o peso do vidro é dado pela Equação (47). No modelo, a variável independente está representada pela letra V , e corresponde ao número de vidrões recolhidos por rota. Este modelo de regressão é simples mas serve o propósito de se obter um valor aproximado do peso dos resíduos previstos recolher, permitindo a execução do algoritmo genético com o modelo CTOPdTW. O modelo de regressão tem um desvio absoluto médio de 708.9 *kg*. Relativamente ao coeficiente de determinação (R^2), o modelo do vidro apresenta um valor de 0.8051, enquanto o modelo do papel e embalagens tem um valor de 0.8846.

$$PESO_{vidro} = 549.22 \cdot V \quad (47)$$

Os testes de agendamento que serão apresentados nas subsecções seguintes foram realizados com os seguintes objetivos:

- Avaliar se a recolha multi-produto compensa em termos de custos relativamente à recolha mono-produto no caso dos resíduos depositados em papelões e embalões.

- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com o desempenho da recolha efetuada pela Braval nas mesmas situações reais.
- Averiguar se as ferramentas desenvolvidas neste trabalho permitem melhorar o desempenho da recolha de resíduos no contexto operacional da Braval.

Durante a execução dos testes optou-se por manter apenas soluções que permitem efetuar um agendamento total dos contentores, isto é, que nenhum ficasse por visitar/recolher.

6.3.2 Agendamento de recolha de vidrões

O vidro é um tipo de resíduo que é facilmente compactável ao ser depositado no vidrão. Por esta razão, o tempo que demora a encher um vidrão é bastante superior ao da maioria dos papelões e embalões. A frequência de recolha dos vidrões é baixa, e em Amares são normalmente executadas rotas para recolha de vidro entre 4 a 6 dias por mês. Assumiu-se que para o período de planeamento será reservado um dia por semana para recolha de vidro. Após se obter a projeção final das recolhas de vidrões, foi necessário identificar para cada semana quais os dias em que se deve realizar a recolha. Para tal, em cada semana deve ser escolhido o dia em que a maioria dos vidrões possui janela temporal ativa, ou seja, o dia em que mais vidrões são elegíveis para recolha. Como o período de planeamento atravessa 5 semanas, foram eleitos 5 dias dedicados à recolha de vidro.

Para o período de planeamento considerado foram previstas 91 visitas a vidrões para recolha, que correspondem ao total de janelas temporais definidas para os vidrões. Assim, o número de vértices a considerar na instância CTOPdTW é 91, pois por cada janela temporal considera-se uma réplica de um vidrão.

Foi referido na secção 6.2.2 que o método de agendamento compreende duas fases de execução, F1 e F2, sendo F2 composto por duas subfases, F2-A e F2-B, e cada subfase pode incluir duas etapas (F2-A1 e F2-A2, F2-B1 e F2-B2). Para realizar o processo de agendamento, o algoritmo executou dez vezes as instâncias CTOPdTW referentes a cada uma das diferentes fases, subfases e etapas, que no total são 5 instâncias. De entre as dez execuções em cada instância, apenas se escolheu para posterior análise a que obteve melhores resultados.

Procedeu-se à execução da primeira fase do agendamento, F1, onde se consideram veículos com capacidade de carga infinita (peso e volume). Os resultados de F1 são apresentados na Tabela 67.

Tabela 67 - Resultado do agendamento obtido em F1.

Dia de Recolha	Dia da Semana	Dia do mês	VIDRÕES RECOLHIDOS	QUANTIDADE PROJETADA (m^3)	QUANTIDADE PROJETADA (kg)
1	SEX	4	19	51.9	10450
2	QUA	7	26	66.5	14300
3	TER	11	20	50.4	11000
4	TER	16	13	32.0	7150
5	TER	21	13	34.4	7150
TOTAL			91	235.2	50050

Na recolha do vidro existem duas restrições de capacidade: capacidade volumétrica e capacidade de carga em termos de peso. No entanto a restrição de capacidade de carga em termos de peso é a mais determinante. Assim, para a fase F2 do agendamento, apenas o peso dos resíduos será considerado um fator limitador no processo da construção das rotas. É com base no valor de peso de resíduos previsto recolher em F1 que é calculado o número de retornos à Braval em cada dia de recolha, e por conseguinte o número de réplicas do veículo. Nas Tabelas 68 e 71 apresentam-se os retornos determinados para as subfases F2-A e F2-B. As instâncias CTOPdTW usadas para a executar F2-A e F2-B devem conter uma réplica do veículo por cada retorno.

Em F2-A, o veículo usado na instância CTOPdTW foi o veículo 3 ($16 m^3$). De acordo com a Tabela 68, apenas no segundo dia são necessários dois veículos iguais (réplicas) para recolher a quantidade prevista, ou um mesmo veículo usado em momentos diferentes. Nos restantes dias uma réplica é suficiente. O resultado do agendamento em F2-A é apresentado na Tabela 69. Para a recolha do dia 7 executam-se duas rotas de modo a ser possível recolher os 14300 kg projetados em F1. A instância CTOPdTW usada em F1 foi modificada para executar F2-A, sendo a única alteração a ativação da restrição de capacidade. Ao processar a instância para F2-A, o algoritmo vai efetuar uma diferente distribuição dos vidros pelas rotas em relação à que foi obtida em F1 para dar resposta à capacidade das viaturas.

Tabela 68 – Retornos necessários para cada dia de recolha na subfase F2-A.

Dia da semana	Retornos necessários por dia				
	SEX	QUA	TER	TER	TER
Dia do mês	4	7	11	16	21
Quantidade Prevista (kg)	10450	14300	11000	7150	7150
Retornos	1	2	1	1	1

Tabela 69 - Resultado do agendamento obtido em F2-A.

Dia da semana	SEX	Dias de Recolha				
		QUA		TER	TER	TER
Dia do mês	4	7		11	16	21
		Rota 1	Rota 2			
VIDRÕES RECOLHIDOS	13	21	18	13	11	15
QUANTIDADE (kg)	7150	11550	9900	7150	6050	8250

Em F2-B foram considerados oito veículos com capacidade de carga diferente em termos do peso que conseguem transportar. Os veículos também diferem em termos de consumo de combustível, e por isso convém considerar este fator aquando da escolha do veículo para cada dia de recolha (ver Tabela 70). De acordo com a Tabela 71, os veículos que permitem menos retornos no total de dias de recolha são os veículos 5, 6 e 8, devido à elevada capacidade de carga. Contudo, o veículo 3 tem capacidade para efetuar as recolhas projetadas com apenas um retorno em cada dia, excepto no segundo dia. O veículo 3 consome menos combustível que os veículos 5, 6 e 8, e por isso constitui a opção que acarreta menos custos para efetuar a recolha em pelo menos quatro dos cinco dias.

Tabela 70 – Capacidade de carga e consumo de combustível dos veículos usados na recolha de vidro.

Veículo	Capacidade de Carga (kg)	Consumo (Litros/100 km)
1	6840	23.15
2	12320	63.74
3	11680	25.19
4	12560	59.65
5	18900	66.63
6	18080	74.92
7	5960	27.85
8	14320	53.65

Tabela 71 - Retornos necessários para cada dia de recolha na subfase F2-B.

Dia de Recolha		Retornos necessários por dia					Total
		1	2	3	4	5	
Quantidade (kg)		10450	14300	11000	7150	7150	
Veículo	1	2	3	2	2	2	11
	2	1	2	1	1	1	6
	3	1	2	1	1	1	6
	4	1	2	1	1	1	6
	5	1	1	1	1	1	5
	6	1	1	1	1	1	5
	7	2	3	2	2	2	11
	8	1	1	1	1	1	5

Na Tabela 72 são apresentadas duas hipóteses de recolha com frota heterogénea, com base nos valores obtidos em F1 para as quantidades previstas recolher. Na hipótese 1 espera-se obter um agendamento que inclua apenas cinco rotas e com o menor consumo de combustível, utilizando para isso os veículos 3 e 8. Na hipótese 2 serão executadas 6 rotas, e duas delas ocorrem no segundo dia de recolhas. Nesta hipótese são usados os veículos 1 e 3, que são os que têm menor consumo de combustível em toda a frota da Braval. Pretende-se comparar o desempenho das duas hipóteses com a estratégia da Braval em termos de custos associados ao consumo de combustível. Não foram testadas outras hipóteses, pois outras combinações não eram atrativas em termos de consumo de combustível ou por falta de capacidade de carga suficiente para recolher os 91 vidrões (50050 kg) projetados.

Tabela 72 – Hipóteses de combinação de veículos testadas para a subfase F2-B.

Dia de Recolha	Veículos (ID)	
	Hipótese 1	Hipótese 2
1	3	3
2	8	1 + 3
3	3	3
4	3	3
5	3	3

O resumo dos resultados do agendamento obtido para as duas hipóteses testadas em F2-B consta na Tabela 73. Na Tabela 74 apresenta-se um resumo dos resultados alcançados em F1, F2-A e F2-B (hipóteses 1 e 2), e o custo de cada rota está presente na última coluna, onde se assume que cada litro de combustível custa 1.00 euro (€). Na Tabela 75 constam dados globais

do desempenho dos agendamentos efetuados, onde se incluíram também dados relativos à recolha de vidrões efetuada pela Braval no período de planeamento escolhido para teste (outubro de 2013).

Tabela 73 - Resultado do agendamento obtido em F2-B.

Dia da semana	Dias de Recolha									
	Hipótese 1					Hipótese 2				
	SEX	QUA	TER	TER	TER	SEX	QUA	TER	TER	TER
Dia do mês	4	7	11	16	21	4	7	11	16	21
Vidrões Recolhidos	20	26	18	13	14	17	21	12	15	13
Quantidade (kg)	11000	14300	9900	7150	7700	9350	11550	6600	8250	7150

Tabela 74 – Resumo dos resultados obtidos nas diferentes fases do agendamento.

Opção de Agendamento	Rota	Quantidade (kg)	Distância (km)	Veículo	Custo em Combustível (€)
F2-A	1	7150	63.14	3	16.35
	2	11550	44.1	3	11.42
	3	9900	51.77	3	13.41
	4	7150	57.48	3	14.89
	5	6050	64.8	3	16.78
	6	8250	65.98	3	17.09
F2-B Hipótese 1	1	11000	66.68	3	17.27
	2	14300	51.78	8	27.78
	3	9900	63.72	3	16.5
	4	7150	68.34	3	17.7
	5	7700	66.75	3	17.29
F2-B Hipótese 2	1	9350	66.61	3	17.25
	2	11550	44.17	3	11.44
	3	6600	40.03	1	9.27
	4	8250	61.4	3	15.9
	5	7150	68.37	3	17.71
	6	7150	61.33	3	15.88

Tabela 75 – Desempenho geral do método de agendamento e da atuação da Braval.

	F2-A	F2-B		BRAVAL
		Hipótese 1	Hipótese 2	
Recolhas (vidrões)	91	91	91	65
Quantidade Total (kg)	50050	50050	50050	33620
Distância Total (km)	347	317	342	318
Performance (kg/km)	144.2	157.9	146.3	105.7
Rotas efetuadas	6	5	6	5
Duração Total	17h 43min	15h 17min	17h 36min	17h 05min
Custo em Combustível (€)	89.94	96.54	87.45	80.10

De acordo a projeção de recolhas efetuadas com o método de agendamento aplicado prevê-se a recolha de 91 vidrões, e a partir da Tabela 75 é possível determinar que são mais 40% de vidrões recolhidos do que a Braval, o que corresponde a um acréscimo de 16430 kg de vidro. A diferença entre o número de vidrões projetados recolher e os que foram recolhidos pela Braval para o período de planeamento pode dever-se ao facto da projeção das recolhas feita com o método de agendamento desenvolvido poder ter sido sobrestimada, uma vez que foi obtida com base nos ritmos médios de enchimento dos vidrões. Os valores determinados para os ritmos de enchimentos estão sujeitos a erros devido ao dinamismo inerente à geração de resíduos por parte dos cidadãos, a qual sofre variações ao longo dos meses do ano.

A *performance* é uma medida que traduz o desempenho em termos de eficiência de recolha, mais especificamente numa taxa que resulta da razão entre a quantidade total de resíduos recolhida e a distância total percorrida. Relativamente à *performance*, a opção com melhor valor é F2-B hipótese 1.

Quanto à duração total das rotas para os cinco dias de recolha, a opção que demora menos a ser executada é a hipótese 1 da subfase F2-B (F2-B-H1). No entanto essa menor duração é obtida à custa de um maior gasto em combustível.

Como é possível observar na Tabela 75, a opção de agendamento que resulta em menores custos em termos de combustível necessário para efetuar a recolha projetada dos vidrões é a hipótese 2 da subfase F2-B do método de agendamento desenvolvido (F2-B-H2). A opção F2-B-H2 tem um custo cerca de 9.3% mais elevado que o da recolha da BRAVAL, mas são recolhidos mais 40% de vidrões. No geral, em termos de custos operacionais, pode-se afirmar que F2-B-H2 poderia proporcionar uma recolha mais eficiente que atuação da Braval.

Globalmente, avaliando todos os indicadores de desempenho obtidos com a utilização do método de agendamento em conjunto com a ferramenta de construção de rotas, pode-se afirmar

que esta metodologia permitiria alcançar uma eficiência superior à que é apresentada pela Braval no caso da recolha do vidro.

6.3.3 Agendamento de recolha multi-produto: papelões e embalões

Os resíduos que são depositados em papelões e embalões incluem maioritariamente resíduos dos tipos papel e cartão (papelão), e dos tipos plástico e metal (embalão). Embalagens domésticas feitas à base destes materiais não são muito compactadas ao serem depositadas nos respetivos contentores de ecoponto, e por essa razão ficam preenchidos rapidamente, obrigando a recolhas mais frequentes.

Nas rotas de recolha efetuadas durante o turno diurno (circuito C1), a Braval opta pela estratégia que consiste em recolher conjuntamente os resíduos depositados nos papelões e embalões, isto é, efetua recolha multi-produto com dois tipos de resíduos. De modo a comparar o método de agendamento desenvolvido com a atuação da Braval na recolha de papelões e embalões serão executados dois tipos de testes: agendamento de recolha multi-produto e agendamento de recolha mono-produto. Com a recolha multi-produto pretende-se fazer uma comparação direta com a estratégia da Braval, e será utilizado o modelo CTOPdTW-MPC. Para resolver a respetiva instância CTOPdTW-MPC utilizou-se a ferramenta cGA-CTOPdTW-MPC. No que diz respeito à recolha mono-produto, o objetivo passa por averiguar se a solução da Braval de recolha mono-produto é realmente a forma mais eficaz e rentável de recolher papelões e embalões. Para simular esta modalidade de recolha aplica-se o modelo CTOPdTW, e para resolver a instância é aplicada a ferramenta cGA-CTOPdTW.

Para a realização dos testes manteve-se o período de planeamento de recolhas escolhido: outubro de 2013. Neste período de tempo existem 23 dias possíveis para efetuar recolhas de acordo com o horário de trabalho aplicado a Amares (circuito C1). Antes de aplicar a ferramenta de construção de rotas realizou-se a projeção das recolhas de papelões e embalões a efetuar durante o mês de outubro. No total foram previstas 571 recolhas, em que 308 são descargas de papelões e 263 são de embalões. Posteriormente deu-se início ao processo de agendamento, o qual se desenvolveu ao longo das fases e subfases que o compõem.

Iniciou-se o processo de agendamento com a fase F1. Considerou-se que serão feitas recolhas nos 23 dias disponíveis, havendo uma rota por cada dia, e cada uma com duração máxima de 8 horas, que coincide com a duração total do turno. Alocou-se um veículo para cada dia, e na instância CTOPdTW constam 23 veículos e as respetivas janelas temporais. Na Tabela

76 apresentam-se os resultados da fase de agendamento F1, onde para cada dia são indicados o número de papelões e embalões recolhidos, bem como a quantidade prevista recolher em metros cúbicos (m^3).

Tabela 76 – Resultados obtidos na fase de agendamento F1.

Dia de Recolha	Dia da Semana	Dia do mês	CONTENTORES RECOLHIDOS		QUANTIDADE PROJETADA (m^3) - Q_{real} com $F_c = 1$
			PAPELÕES	EMBALÕES	
1	TER	1	16	10	10.66
2	QUA	2	10	13	8.682
3	QUI	3	11	9	8.619
4	SEX	4	14	11	9.699
5	SEG	7	15	10	10.67
6	TER	8	16	10	10.272
7	QUA	9	13	13	10.399
8	QUI	10	11	9	8.024
9	SEX	11	13	14	9.478
10	SEG	14	18	10	12.719
11	TER	15	13	12	9.836
12	QUA	16	11	10	7.494
13	QUI	17	14	13	11.825
14	SEX	18	13	8	7.767
15	SEG	21	17	14	11.711
16	TER	22	14	12	10.992
17	QUA	23	11	15	10.795
18	QUI	24	11	14	9.705
19	SEX	25	12	9	8.029
20	SEG	28	21	10	12.384
21	TER	29	11	16	11.038
22	QUA	30	13	9	7.919
23	QUI	31	10	12	9.471
TOTAL			308	263	228.188

Uma vez obtidas as previsões de quantidade a recolher em cada dia, procedeu-se à execução da fase F2 do agendamento, composta pelas subfases F2-A (frota homogénea) e F2-B (frota heterogénea). Realizou-se em primeiro lugar o agendamento para a subfase F2-A, e foi calculado o número de retornos ou rotas a realizar em cada um dos 23 dias de recolha. Na Tabela 77 consta o número de retornos calculados para as etapas F2-A1 e F2-A2 para veículos que possuem compactador. Para os que não possuem compactador, os retornos estão indicados na Tabela 78. Para determinar o número de retornos necessários foram consideradas as quantidades previstas a recolher em F1, e determinaram-se os retornos para oito possíveis

opções de contentor de carga de camião: 7, 9, 15, 16, 17, 20, 25 e 30 m^3 . No caso dos veículos com compactador, para cada dia apenas se obteve um retorno ou rota, tanto em F2-A1 como em F2-A2. No caso dos veículos sem compactador, foi possível reduzir o número de rotas para as opções de contentor de carga de 7 e 9 m^3 .

Tabela 77 – Determinação dos retornos necessários na etapa F2-A1 e F2-A2 para contentores de carga de veículos com compactador.

DIA DE RECOLH A	QUANTIDADE PROJETADA (m^3) - Q_{real} com $F_c = 0.7$	RETORNOS POR DIA DE RECOLHA					
		CONTENTOR DE CARGA (m^3)					
		15	16	17	20	25	30
1	7.462	1	1	1	1	1	1
2	6.077	1	1	1	1	1	1
3	6.033	1	1	1	1	1	1
4	6.789	1	1	1	1	1	1
5	7.469	1	1	1	1	1	1
6	7.19	1	1	1	1	1	1
7	7.279	1	1	1	1	1	1
8	5.617	1	1	1	1	1	1
9	6.635	1	1	1	1	1	1
10	8.903	1	1	1	1	1	1
11	6.885	1	1	1	1	1	1
12	5.246	1	1	1	1	1	1
13	8.278	1	1	1	1	1	1
14	5.437	1	1	1	1	1	1
15	8.198	1	1	1	1	1	1
16	7.694	1	1	1	1	1	1
17	7.557	1	1	1	1	1	1
18	6.794	1	1	1	1	1	1
19	5.62	1	1	1	1	1	1
20	8.669	1	1	1	1	1	1
21	7.727	1	1	1	1	1	1
22	5.543	1	1	1	1	1	1
23	6.63	1	1	1	1	1	1
TOTAL ROTAS / RETORNOS		23	23	23	23	23	23

Tabela 78 - Determinação dos retornos necessários nas etapas F2-A1 e F2-A2 para contentores de carga de veículos sem compactador.

DIA DE RECOLHA	QUANTIDADE PROJETADA (m^3) - Q_{real} com $F_c = 1$ (m^3)	RETORNOS POR DIA DE RECOLHA					
		CONTENTOR DE CARGA (m^3)					
		7		9		16	
		F2-A1	F2-A2	F2-A1	F2-A2	F2-A1	F2-A2
1	10.66	2	2	2	2	1	1
2	8.682	2	1	1	1	1	1
3	8.619	2	1	1	1	1	1
4	9.699	2	2	2	1	1	1
5	10.67	2	2	2	2	1	1
6	10.272	2	2	2	2	1	1
7	10.399	2	2	2	2	1	1
8	8.024	2	1	1	1	1	1
9	9.478	2	2	2	1	1	1
10	12.719	2	2	2	2	1	1
11	9.836	2	2	2	1	1	1
12	7.494	2	1	1	1	1	1
13	11.825	2	2	2	2	1	1
14	7.767	2	1	1	1	1	1
15	11.711	2	2	2	2	1	1
16	10.992	2	2	2	2	1	1
17	10.795	2	2	2	2	1	1
18	9.705	2	2	2	1	1	1
19	8.029	2	1	1	1	1	1
20	12.384	2	2	2	2	1	1
21	11.038	2	2	2	2	1	1
22	7.919	2	1	1	1	1	1
23	9.471	2	2	2	1	1	1
TOTAL ROTAS / RETORNOS		46	39	39	34	23	23

Apresenta-se um resumo dos resultados alcançados para F2-A na Tabela 80 (veículos com compactador) e Tabela 81 (veículos sem compactador). Os resultados detalhados constam na Tabela 118 e Tabela 119 (Anexos IV) Nesta subfase considera-se que um mesmo veículo é utilizado em todos os dias de recolha do período de planeamento. O custo de cada rota foi calculado de acordo com os dados da Tabela 79. Os custos para os diferentes veículos da frota da Braval são apresentados na Tabela 80. Partindo dos valores da tabela, a opção de agendamento que implica menores custos em termos de combustível é o veículo 3, com um total cerca de 335€. A opção mais dispendiosa assenta na utilização do veículo 6 (996€).

Tabela 79 - Consumo de combustível e capacidade de carga e dos veículos usados na recolha de papelões e embalões.

Veículo	Consumo (Litros/100 km)	Contentores de Carga (m ³)
1	23.15	7
2	63.74	16, 17, 20
3	25.19	16
4	59.65	16, 17, 20
5	66.63	16, 17, 20, 25, 30
6	74.92	16, 17, 20, 25
7	27.85	9
8	53.65	16
9	44.00	15
10	48.00	15

Tabela 80 - Resumo dos resultados para o agendamento na subfase F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Distância (km)	Custo em Combustível (€)					
		VEÍCULOS - ID					
		2	4	5	6	9	10
TOTAL	1329	847.16	792.8	885.59	995.75	585.34	638.11

Tabela 81 - Resumo dos resultados para o agendamento na subfase F2-A para veículos sem compactador.

Rota / Dia de Recolha	Distância (km)			Custo em Combustível (€)			
	VEÍCULOS - ID			VEÍCULOS - ID			
	1	7	3, 8	1	3	7	8
TOTAL	1932	1774	1329	447.31	334.78	493.92	713.04

Concluída a subfase F2-A, prosseguiu-se com a execução da subfase F2-B, onde se pretende estudar a utilização de uma frota heterogénea para efetuar as recolhas durante o período de planeamento. Os fatores importantes para a seleção dos veículos e respetivos contentores de carga são: 1) o consumo de combustível; 2) quantidade de resíduos a recolher. Nesta subfase torna-se importante explorar diferentes combinações de veículos e contentores de carga, de modo a explorar formas mais eficientes de utilização destes recursos, ao mesmo tempo que se procura diminuir os custos com combustível. No entanto, como se pode observar na Tabela 77, a quantidade de resíduos prevista recolher não é um fator determinante, pois qualquer um dos seis veículos considerados é capaz de transportar a quantidade total de cada dia numa só rota, mesmo com o contentor de carga com menor capacidade que conseguem acoplar. A mesma situação é observada com os veículos 3 e 8 na Tabela 78.

Foi referido que em F2-A se verificou que o veículo 3 é o que permite maior poupança em termos de custos com o combustível, e por conseguinte, uma abordagem com frota heterogénea só poderá alcançar custos menores se em algumas rotas for utilizado o veículo 1, uma vez que é o veículo mais económico da Braval em termos de consumo de combustível. Para considerar a utilização do veículo 1, não se contabiliza o fator de compactação (F_c) nas quantidades a recolher na rota que lhe for atribuída (não possui compactador), enquanto para o veículo 3 o valor de F_c deve ser usado para corrigir a quantidade projetada em F1 para cada dia em que efetuar recolha. Foram testadas 20 combinações de veículos 1 e 3 para realizar a recolha conjunta de papelões e embalões. Contudo, na Tabela 82 apenas se apresenta a combinação que permitiu maior poupança de combustível.

Tabela 82 – Resultados obtidos com a combinação de veículos da subfase F2-B.

Dia de Recolha	Quantidade (m^3) - $F_c = 1$	Quantidade (m^3) - $F_c = 0.7$	Veículos (ID)	Distância (km)	Custo em Combustível (€)
1	10.66	7.462	3	64.8	16.32
2	8.682	6.077	3	66.27	16.69
3	8.619	6.033	3	58.7	14.79
4	9.699	6.789	3	74.19	18.69
5	10.67	7.469	3	62.08	15.64
6	10.272	7.19	3	67.7	17.05
7	10.399	7.279	3	69.04	17.39
8	8.024	5.617	1	77.22	17.88
9	9.478	6.635	3	68.77	17.32
10	12.719	8.903	3	58.1	14.64
11	9.836	6.885	3	72.99	18.39
12	7.494	5.246	1	65.95	15.27
13	11.825	8.278	3	60.73	15.3
14	7.767	5.437	3	71.62	18.04
15	11.711	8.198	3	75.67	19.06
16	10.992	7.694	3	75.52	19.02
17	10.795	7.557	3	77.28	19.47
18	9.705	6.794	3	57.17	14.4
19	8.029	5.62	3	67.04	16.89
20	12.384	8.669	3	53.53	13.48
21	11.038	7.727	3	73.41	18.49
22	7.919	5.543	1	60.63	14.04
23	9.471	6.63	3	60	15.11
TOTAL				1538	383.37

Após execução da subfase F2-B foi possível elaborar a Tabela 83, na qual se apresentam os resultados globais do desempenho do agendamento efetuado para as subfases F2-A e F2-B. Partindo destes resultados, identificou-se a opção de agendamento F2-A como a mais económica, pois apresenta um custo de 335€ que é inferior ao custo de F2-B (383€). A recolha com base em frota homogénea (F2-A) tem uma duração inferior à da recolha com frota heterogénea (F2-B). A mesma relação se verifica em termos de distância total percorrida.

Tabela 83 - Desempenho geral do método de agendamento para recolha de conjunta de papelões e embalões.

		AGENDAMENTO	
		F2-A	F2-B
Dias de recolha		23	23
Recolhas	Papelões	308	308
	Embalões	263	263
Distância Total (km)		1459	1538
Performance (kg/km)		17.3	16.4
Rotas efetuadas		23	23
Duração Total		67h 59 min	70h 12min
Duração Média por Rota		2h 57min	3h 03min
Recolhas por Rota (média)		25	25
Custo em Combustível (€)		334.78	383.37

Existem algumas razões que podem explicar o facto de que a utilização de frota homogénea se traduziu em menores distâncias percorridas e custos do que no cenário com frota heterogénea. As possíveis razões são as seguintes:

- O algoritmo genético alcançou um valor ótimo local no cenário com frota homogénea, e tal não sucedeu ao processar a instância relativa ao cenário com frota heterogénea;
- Ao elaborar a instância para um cenário com frota heterogénea está-se a definir de forma absoluta que veículo é alocado para cada dia do período de planeamento. A alocação de veículos com diferentes capacidades leva a uma diferente distribuição dos contentores pelas rotas de recolha de cada veículo. Tal situação pode impedir que um veículo recolha alguns contentores, passando estes a ser recolhidos por outro veículo numa rota ou dia diferente, o que se pode traduzir num aumento da distância total percorrida no período de planeamento, de modo a agendar todas as recolhas previstas.

- No cenário de frota heterogénea foi testada a combinação dos veículos 1 e 3. O veículo 1 não possui compactador, ao invés do veículo 3. Esta situação pode traduzir-se no impedimento de recolha de certos contentores pelo veículo 1, passando esses contentores para outra(s) rota(s) de outro(s) dia(s) de recolha, resultando possivelmente em maiores distâncias percorridas para compensar o reagendamento desses contentores em relação ao cenário com frota homogénea.

6.3.4 Agendamento de recolha de papelões

Os testes de agendamento para recolha mono-produto de papelões foram realizados ao longo das fases F1 e F2, sendo que esta última se desenvolveu nas subfases F2-A (frota homogénea) e F2-B (frota heterogénea). Os resultados para a etapa F1 são apresentados na Tabela 84, e serviram como base para executar F2-A e F2-B.

Tabela 84 – Resultados do agendamento da recolha de papelões na fase F1.

Dia de Recolha	Dia da Semana	Dia do mês	PAPELÕES RECOLHIDOS	DISTÂNCIA A PERCORRER (km)	QUANTIDADE PROJETADA (m^3) - Q_{real} com $F_c = 1$
1	TER	1	13	57.24	5.775
2	QUA	2	10	60.87	3.675
3	QUI	3	15	48.16	6.452
4	SEX	4	14	69.31	5.696
5	SEG	7	12	41.18	5.259
6	TER	8	13	60.48	5.139
7	QUA	9	13	57.01	5.576
8	QUI	10	11	44.42	4.322
9	SEX	11	16	68.84	5.836
10	SEG	14	20	56.28	8.858
11	TER	15	16	68.06	6.453
12	QUA	16	9	54.91	3.679
13	QUI	17	13	43.39	5.12
14	SEX	18	12	65.68	4.691
15	SEG	21	16	62.19	6.52
16	TER	22	15	72.61	6.172
17	QUA	23	9	56.42	4.041
18	QUI	24	15	43.83	6.235
19	SEX	25	11	60.38	4.01
20	SEG	28	18	49.57	8.61
21	TER	29	13	57.86	5.046
22	QUA	30	12	64.77	4.269
23	QUI	31	12	65.63	4.817
TOTAL			308	1329.09	126.251

Nas Tabelas 85 e 86 apresenta-se o número de retornos necessários para efetuar as recolhas diariamente para a etapa F2-A1 com base nas quantidades determinadas em F1. A Tabela 85 diz respeito aos contentores de carga usados por veículos que possuem compactador, enquanto a Tabela 86 se refere a veículos desprovidos de compactador. Para todos os tipos de contentor são necessários 23 retornos ou rotas, excepto para o contentor de $7 m^3$ que necessita de 25.

Tabela 85 – Determinação dos retornos necessários na etapa F2-A1 para contentores de carga de veículos com compactador.

Dia de Recolha	Q_{real} com $F_c = 0.7 (m^3)$	RETORNOS POR DIA DE RECOLHA					
		CONTENTOR DE CARGA (m^3)					
		15	16	17	20	25	30
1	4.043	1	1	1	1	1	1
2	2.573	1	1	1	1	1	1
3	4.516	1	1	1	1	1	1
4	3.987	1	1	1	1	1	1
5	3.681	1	1	1	1	1	1
6	3.598	1	1	1	1	1	1
7	3.903	1	1	1	1	1	1
8	3.025	1	1	1	1	1	1
9	4.085	1	1	1	1	1	1
10	6.201	1	1	1	1	1	1
11	4.517	1	1	1	1	1	1
12	2.576	1	1	1	1	1	1
13	3.584	1	1	1	1	1	1
14	3.284	1	1	1	1	1	1
15	4.564	1	1	1	1	1	1
16	4.320	1	1	1	1	1	1
17	2.829	1	1	1	1	1	1
18	4.364	1	1	1	1	1	1
19	2.807	1	1	1	1	1	1
20	6.027	1	1	1	1	1	1
21	3.532	1	1	1	1	1	1
22	2.988	1	1	1	1	1	1
23	3.372	1	1	1	1	1	1
TOTAL ROTAS / RETORNOS		23	23	23	23	23	23

Tabela 86 – Determinação dos retornos necessários na etapa F2-A1 para contentores de carga de veículos sem compactador.

Dia de Recolha	Q_{real} com $F_c = 1$ (m^3)	RETORNOS POR DIA DE RECOLHA		
		CONTENTOR DE CARGA (m^3)		
		7	9	16
1	5.775	1	1	1
2	3.675	1	1	1
3	6.452	1	1	1
4	5.696	1	1	1
5	5.259	1	1	1
6	5.139	1	1	1
7	5.576	1	1	1
8	4.322	1	1	1
9	5.836	1	1	1
10	8.858	2	1	1
11	6.453	1	1	1
12	3.679	1	1	1
13	5.120	1	1	1
14	4.691	1	1	1
15	6.520	1	1	1
16	6.172	1	1	1
17	4.041	1	1	1
18	6.235	1	1	1
19	4.010	1	1	1
20	8.610	2	1	1
21	5.046	1	1	1
22	4.269	1	1	1
23	4.817	1	1	1
TOTAL ROTAS / RETORNOS		25	23	23

Na Tabela 87 constam os retornos necessários para a etapa F2-A2. Apenas para o contentor de $7 m^3$ houve minimização do número de retornos/rotas, passando de 25 para 23. Com os restantes contentores já se tinha obtido o mínimo de um retorno/rota por dia.

Prosseguiu-se com a execução do agendamento para a subfase F2-A de acordo com o número de retornos determinados em F2-A2, e obtiveram-se os resultados que figuram nas Tabelas 88 e 89, de onde se conclui que o veículo 1 com o seu contentor de carga fixo de $7 m^3$ constitui a opção mais económica para efetuar a recolha. Os resultados detalhados encontram-se na Tabela 120 e Tabela 121 (Anexos IV).

Tabela 87 - Retornos necessários na etapa F2-A2 para contentores de carga de veículos com e sem compactador.

VEÍCULOS	Sem Compactador			Com Compactador			
	CONTENTOR (m^3)	7	16	16	17	20	25
TOTAL ROTAS / RETORNOS	23	23	23	23	23	23	23

Tabela 88 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m^3)	Distância (km)	Custo em Combustível (€)					
			VEÍCULOS - ID					
			2	4	5	6	9	10
TOTAL	88.376	1329.09	847.16	792.8	885.59	995.75	585.34	638.11

Tabela 89 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m^3)		Distância (km)		Custo em Combustível (€)			
	VEÍCULOS - ID		VEÍCULOS - ID		VEÍCULOS - ID			
	1	3, 7, 8	1	3, 7, 8	1	3	7	8
TOTAL	126.251		1334	1329	308.86	334.78	370.13	713.04

Na execução da subfase F2-B foram consideradas diferentes hipóteses de combinação de veículos e contentores de carga com base nas quantidades projetadas em F1. No entanto, a opção que provou ser a mais económica consiste em utilizar o veículo 1 todos os dias de recolha excepto os dias 10 e 20, para os quais a quantidade é superior à capacidade do contentor de carga. Nesses dias deve ser usado o veículo 3, que é o segundo mais económico da frota da Braval. Os resultados da melhor combinação obtida em F2-B constam na Tabela 90, onde se compara o desempenho do agendamento nas diferentes fases que o compõem. Analisando a tabela, observa-se que o desempenho na subfase F2-B é globalmente melhor em relação a F2-A, pois a recolha dos 308 papelões tem a duração mais baixa (51 horas e 38 minutos), e o custo associado ao consumo de combustível ($\approx 305\text{€}$) é o menor de entre as duas opções de agendamento. No entanto, a ordem de grandeza dos custos em F2-A e F2-B é semelhante.

Tabela 90 - Desempenho geral do método de agendamento para recolha de papelões.

	Agendamento	
	F2-A	F2-B
Dias de recolha	23	23
Recolhas de Papelões	308	308
Distância Total (km)	1334	1308
Performance (kg/km)	11.55	11.78
Rotas efetuadas	23	23
Duração Total	52h 21 min	51h 38min
Duração Média por Rota	2h 16min	2h 14min
Recolhas por Rota (média)	13	13
Custo em Combustível (€)	308.86	304.9

6.3.5 Agendamento de recolha de embalões

Os testes de agendamento para recolha mono-produto de embalões foram realizados ao longo das fases F1 e F2, sendo que esta última se desenvolveu nas subfases F2-A (frota homogénea) e F2-B (frota heterogénea). Os resultados para a etapa F1 são apresentados na Tabela 91, e serviram como base para executar F2-A e F2-B.

Tabela 91 - Resultados do agendamento da recolha de papelões na fase F1.

Dia de Recolha	Dia da Semana	Dia do mês	EMBALÕES RECOLHIDOS	DISTÂNCIA A PERCORRER (km)	QUANTIDADE PROJETADA (m^3) - Q_{real} com $F_c = 1$
1	TER	1	11	50.67	4.200
2	QUA	2	11	52.43	4.403
3	QUI	3	10	52.51	3.800
4	SEX	4	12	52.5	4.688
5	SEG	7	9	61.78	3.754
6	TER	8	12	60.31	4.698
7	QUA	9	10	58.26	3.962
8	QUI	10	11	43.98	4.788
9	SEX	11	12	62.36	4.184
10	SEG	14	15	44.64	5.621
11	TER	15	12	56.96	4.796
12	QUA	16	7	55.95	2.820
13	QUI	17	11	43.28	5.165
14	SEX	18	11	36.48	3.766
15	SEG	21	11	66.23	4.499
16	TER	22	14	68.55	5.824

17	QUA	23	15	51.6	5.940
18	QUI	24	11	50.87	4.364
19	SEX	25	9	54.18	3.134
20	SEG	28	13	45.35	4.813
21	TER	29	15	63.63	6.367
22	QUA	30	10	57.66	3.986
23	QUI	31	11	43.42	4.646
TOTAL			263	1233.6	104.218

Na Tabela 92 apresenta-se o número de retornos necessários para efetuar as recolhas diariamente para a subfase F2-A com base nas quantidades determinadas em F1. A subfase F2-A não se repartiu pelas etapas F2-A1 e F2-A2 uma vez que para todos os tipos de contentor são necessários 23 retornos ou rotas para efetuar a recolha dos embalões, e por isso não existe necessidade de minimizar o número de retornos uma vez para cada dia foi agendada no máximo uma rota.

Tabela 92 – Retornos necessários na F2-A para contentores de carga de veículos com e sem compactador.

VEÍCULOS	Sem Compactador			Com Compactador			
	7	16	16	17	20	25	30
CONTENTOR (m^3)							
TOTAL ROTAS / RETORNOS	23	23	23	23	23	23	23

Prosseguiu-se com a execução do agendamento para a subfase F2-A de acordo com o número de retornos determinados, e obtiveram-se os resultados que figuram nas Tabelas 93 e 94, de onde se conclui que o veículo 1 com o seu contentor de carga fixo de $7 m^3$ constitui a opção mais económica para efetuar a recolha em cada um dos 23 dias. Os resultados mais detalhados para a subfase F2-A encontram-se na Tabela 122 e Tabela 123 (Anexos IV).

Tabela 93 – Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m^3)	Distância (km)	Custo em Combustível (€)					
			VEÍCULOS - ID					
			2	4	5	6	9	10
TOTAL	72.954	1233.6	786.29	735.83	821.93	924.21	543.28	592.24

Tabela 94 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m^3)	Distância (km)	Custo em Combustível (€)			
			VEÍCULOS - ID			
			1	3	7	8
TOTAL	104.218	1233.6	285.59	310.73	343.56	661.83

Observou-se que para recolher as quantidades projetadas em F1, quer se utilize veículos com compactador ou não, o número de retornos necessários é sempre de apenas um por dia. Assim sendo, a execução da subfase F2-B não necessita de explorar combinações de veículos diferentes, pois somente recorrendo ao veículo 1 para efetuar as recolhas nos 23 dias projetados é possível obter a solução mais económica possível considerando a frota da Braval.

Por fim, conclui-se que a aplicação do método de agendamento à recolha de embalões em modo mono-produto se reduziu neste caso à execução da subfase F2-A. Na Tabela 95 apresentam-se um resumo dos resultados obtidos que permite uma visão geral do desempenho alcançado.

Tabela 95 - Desempenho geral do método de agendamento para recolha de embalões.

	Agendamento
	F2-A
Dias de recolha	23
Recolhas de Papelões	263
Distância Total (km)	1234
Performance (kg/km)	11.55
Rotas efetuadas	23
Duração Total	47h 13min
Duração Média por Rota	2h 03min
Recolhas por Rota (média)	11
Custo em Combustível (€)	285.59

6.3.6 Considerações finais sobre os testes de agendamento

Ao longo da secção 6.3 foram apresentados os resultados dos testes efetuados para obter o agendamento de rotas de recolha dos resíduos depositados nos vidrões, papelões e embalões situados no concelho de Amares. O período de planeamento para o qual se simularam as

recolhas foi o mês de outubro de 2013. Com estes testes de agendamento pretendia-se explorar a possibilidade do método desenvolvido permitir alcançar um desempenho superior à atuação da empresa Braval. Nos cenários finais que foram testados, o método de agendamento desenvolvido foi capaz de superar o desempenho da Braval no período de planeamento escolhido.

No caso da recolha de papelões e embalões, a Braval adoptou a estratégia da recolha multi-produto, ou seja, efetua recolha conjunta de resíduos depositados em papelões e embalões, utilizando o mesmo veículo. De modo a averiguar se esta estratégia é realmente compensadora em termos de desempenho geral, e acima de tudo em termos de custos em combustível e manutenção dos veículos, realizaram-se testes de agendamento para papelões e embalões em modo de recolha mono-produto e multi-produto. Uma comparação de desempenho entre estas duas modalidades de recolha é apresentada na Tabela 96. É perceptível o superior desempenho da estratégia de recolha multi-produto, seja em termos de distância total percorrida, de duração total da recolha, ou de custo em combustível. Além disso, ao percorrer menores distâncias também se reduzem os custos com a manutenção dos veículos, pois há menor desgaste destes.

No agendamento da recolha mono-produto, as rotas projetadas têm todas uma duração inferior a 4 horas, e por isso em cada turno diário de 8 horas, um mesmo veículo pode executar uma rota para papelões e outra para embalões.

Tabela 96 – Comparação entre o agendamento da recolha multi-produto e da recolha mono-produto em termos de desempenho geral.

	Recolha Multi-Produto Papelões+Embalões	Recolha Mono-Produto		
		PAPELÕES	EMBALÕES	TOTAL
Dias de recolha	23	23	23	
Rotas efetuadas	23	23	23	46
Distância Total (km)	1459	1308	1234	2542
Duração Total	67h 59 min	51h 38min	47h 13min	98h 51min
Custo em Combustível (€)	334.78	304.9	285.59	590.49

De modo a se poder realizar uma comparação da recolha mono-produto e multi-produto com a Braval, foram recolhidos dados relativos às recolhas de papelões e embalões efetuadas pela Braval no período de planeamento escolhido (outubro de 2013). Esses dados foram incluídos na Tabela 97, onde consta também um resumo dos resultados obtidos com o método de agendamento desenvolvido nas modalidades de recolha mono-produto e multi-produto.

Tabela 97 – Desempenho do método de agendamento e da atuação da Braval na recolha de papelões e embalões.

		AGENDAMENTO		BRAVAL
		Recolha Multi-Produto	Recolha Mono-Produto	
Dias de recolha		23	46	18
Recolhas	Papelões	308	308	230
	Embalões	263	263	263
Distância Total (km)		1459	2542	1492
Performance (kg/km)		17.3	9.9	18.0
Rotas efetuadas		23	46	29
Duração Total		67h 59 min	98h 51min	78h 50min
Duração Média por Rota		2h 57min	2h 09min	2h 43min
Recolhas por Rota (média)		25	12	17
Custo em Combustível (€)		334.78	590.49	716.3

A aplicação de método de agendamento resultou na projeção de 571 recolhas, das quais 308 são de papelões e 263 de embalões. A Braval recolheu o mesmo número de embalões (263), e o número de papelões foi de 230. No total a Braval efetuou 493 recolhas, menos 78 do que as previstas com o nosso método de agendamento.

Partindo das informações da Tabela 97, verifica-se um desempenho geral superior por parte do agendamento efetuado quando comparado com a atuação da Braval para o mesmo período de planeamento. Os valores obtidos nos vários indicadores de desempenho são analisados em seguida.

Em termos de distância total percorrida, o método de agendamento aplicado permitiu efetuar 571 recolhas em 1459 quilómetros com a estratégia multi-produto, enquanto a Braval necessitou de 1492 quilómetros para executar 493 recolhas. Aparentemente, com a aplicação do método de agendamento é possível recolher mais contentores percorrendo distâncias menores. No entanto, o maior fator para obter este desempenho está relacionado com o algoritmo de encaminhamento de veículos que foi usado: o cGA-TOP. De modo a determinar a influência do algoritmo efetuou-se uma simulação das recolhas realizadas pela Braval em outubro de 2013. Consultaram-se os registos da empresa onde estão identificados os contentores que foram recolhidos em cada rota e em cada dia. Criaram-se instâncias no formato CTOPdTW para cada um dos 18 dias de recolha. Por fim as instâncias foram executadas pelo

algoritmo e como resultado foram efetuadas as mesmas 493 recolhas mas com uma distância percorrida de apenas 1091 quilómetros. Considerando a utilização do veículo mais utilizado pela Braval (veículo 10) para executar todas essas recolhas, a possível poupança em termos de custos com combustível é cerca de 176 euros (€).

A soma da duração de todas as rotas traduz-se na duração total da recolha, e é notória a diferença de quase 11 horas entre a solução apresentada na recolha multi-produto (67 horas e 59 minutos) e a atuação da Braval (78 horas e 50 minutos). A recolha mono-produto revela-se significativamente menos eficiente em termos de tempo despendido na recolha (98 horas e 51 minutos).

Relativamente aos custos em combustível para executar as recolhas em outubro de 2013, a Braval apresenta um total de 716€ com a utilização do veículo 10, enquanto com o método de agendamento foi possível determinar soluções que permitem obter poupanças. Com o agendamento de recolha multi-produto, a poupança é de aproximadamente 381€, caso se use o veículo 3. Caso se utilizasse o veículo 10 no agendamento a poupança seria de 78€. O agendamento com recolha mono-produto envolve 590€ de custo, o que se traduz numa poupança de 126€ quando comparado com a Braval. Porém, a recolha mono-produto implica um excedente de 20 horas de trabalho durante o mês de outubro, e 1050 *km* percorridos a mais do que a Braval nesse período de tempo. Convém no entanto considerar o facto de a Braval ter efetuado menos recolhas que o que foi previsto com o método de agendamento, e por isso torna-se difícil uma comparação direta. Ainda assim, é possível antever que caso a previsão das recolhas coincidissem com a atuação da Braval, o desempenho superior do método de agendamento seria ainda mais notório.

Ainda em relação aos dados da Tabela 97, existem dois indicadores relacionados com a carga de trabalho média por rota: 1) duração média por rota, e 2) média de recolhas por rota. Com o método de agendamento multi-produto, a duração média das rotas é de 2 horas e 57 minutos, e recolhem-se 25 contentores em média por rota. Na recolha mono-produto a duração média é de 2 horas e 9 minutos, e 12 contentores são recolhidos em média em cada rota. Por seu lado, a Braval apresenta por cada rota uma duração média de 2 horas e 43 minutos e uma média de 17 recolhas de contentores. Com este nível de serviço, se a Braval necessitar de recolher 25 contentores, serão necessárias aproximadamente 4 horas para o fazer. Nestes termos, pode-se afirmar que com o método de agendamento desenvolvido, a recolha de um certo número de contentores pode ser executada em menos tempo e com melhor

aproveitamento dos veículos, uma vez que transportam maiores quantidades de resíduos em cada rota.

Uma conclusão que se extrai da aplicação do método de agendamento desenvolvido é que para executar a recolha de papelões e embalões em Amares, a Braval utiliza uma frota que está sobredimensionada em termos de capacidade, o que se traduz na utilização de veículos que tendem a ser maiores e que são menos económicos em termos de consumo de combustível. De entre os restantes concelhos onde atua a empresa Braval devem existir mais casos como o de Amares, e como um objetivo central na recolha de RED é a redução de custos, então uma solução seria substituir uma parte da frota por veículos com menor capacidade de carga mas mais económicos em termos de consumo de combustível.

Outra questão que pode constituir interesse para a melhoria da eficiência na recolha de resíduos é a uniformização da carga de trabalho diário. Durante a análise dos dados das recolhas efetuadas pela Braval observou-se a ocorrência de oscilações acentuadas no número de contentores recolhidos em cada dia. Como se pode observar na Figura 48, é comum surgirem dias em que ocorrem picos em termos do número de recolhas de contentores. Também se observam com frequência dias em que se recolhem cinco ou menos contentores. No entanto, segundo o agendamento efetuado, os picos são amenizados e deixam de existir dias com recolhas muito abaixo da média, especialmente com a estratégia multi-produto. Esta situação permite que haja uma melhor distribuição da carga de trabalho ao longo dos dias, tornando-a mais uniforme, o que pode ser benéfico para a gestão das operações de recolha por parte da Braval, e os trabalhadores mantêm uma rotina de atividade em termos de duração das rotas.

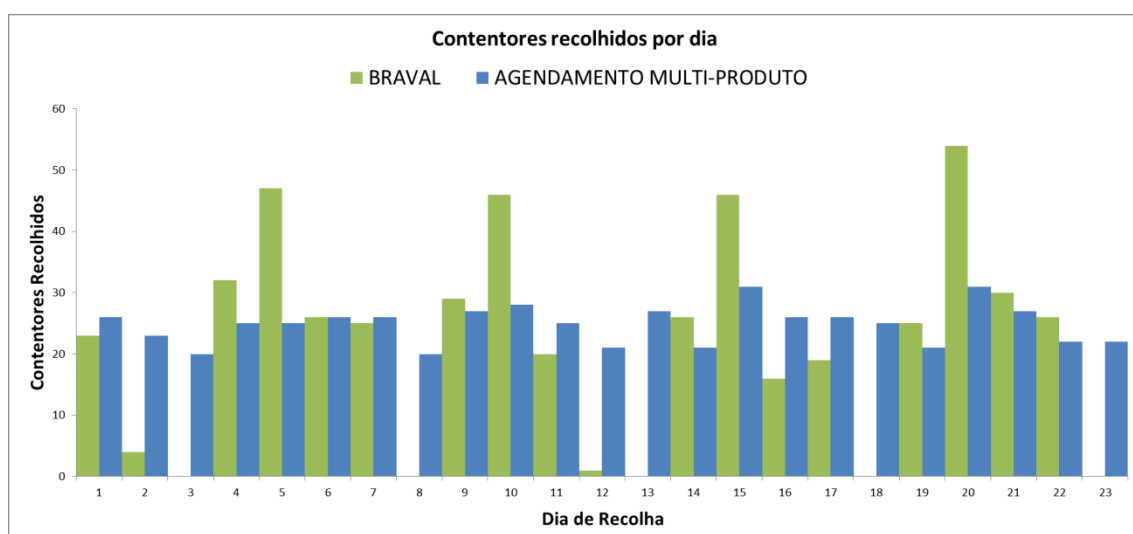


Figura 48 - Contentores recolhidos pela BRAVAL e pelo método de agendamento.

Na Tabela 97, observa-se que com o método de agendamento foram projetadas recolhas para 23 dias, enquanto a Braval efetuou recolhas em apenas 18 dias. No entanto, havendo necessidades especiais em termos operacionais que obriguem a ter de se efetuar rotas de recolha em menos dias, basta modificar os ficheiros das instâncias que são executadas pelas ferramentas desenvolvidas para resolver o encaminhamento de veículos, podendo-se alterar as janelas temporais dos contentores e/ou dos veículos, bem como o número de veículos disponíveis. Outra forma de reduzir ao número de dias de recolha passa por antecipar ou atrasar a execução da(s) rota(s) de um determinado dia, passando para o dia anterior ou para o seguinte, desde que a soma da duração das rotas num dia não ultrapasse 8 horas de trabalho. Ao seguir esta opção pode ser vantajoso executar instâncias individuais para os dias que incluem rotas de dias anteriores ou posteriores, de modo a re-otimizar a distribuição dos contentores a visitar pelas rotas, com vista a minimizar distâncias.

Fazendo uma apreciação global dos resultados obtidos e dos indicadores de desempenho considerados nos testes de agendamento da recolha de papelões e embalões, pode-se afirmar que a utilização do método de agendamento em conjunto com a ferramenta de construção de rotas constitui uma metodologia que permite alcançar uma eficiência superior à que é apresentada pela Braval no caso da recolha de resíduos depositados em papelões, embalões e vidrões. Contudo deve-se ter em consideração que a Braval lida com situações estocásticas, onde a ocorrência de imprevistos e situações adversas aleatórias afetam o desempenho da recolha de RED. Na aplicação do método de agendamento de recolhas assumem-se cenários puramente determinísticos, o que proporcionou um ambiente controlado para os testes de validação realizados.

CAPÍTULO VII

ANÁLISE MULTI-CRITÉRIO NA GESTÃO DA RECOLHA DE RESÍDUOS

7.1 Importância da análise de decisão multi-critério no contexto da coleta de resíduos

Uma boa gestão do processo de coleta de resíduos depende da aplicação de bons sistemas logísticos que são capazes de dar resposta a diferentes objetivos que as empresas pretendam atingir. Neste contexto, o agente de decisão (AD) tem de gerir um conjunto de recursos (veículos, condutores, ecopontos, tempo, etc.) enquanto projeta rotas de coleta que sejam eficientes de acordo com vários critérios ou indicadores de desempenho. Quando uma série de critérios condicionam a tomada de decisão por parte do AD ao ponto de não ser óbvia a escolha da solução ou estratégia de coleta para uma dada situação, o AD tem de pesar a importância de cada critério. Esta situação leva à criação de diferentes cenários operacionais que necessitam de ser avaliados de modo a permitir ao AD identificar a melhor solução para uma determinada situação.

Na coleta de RED para reciclagem não é de todo incomum haver alterações na importância dos requisitos ou indicadores de desempenho enquanto se tentam alcançar objetivos diferentes. Por exemplo, em algumas situações quando se coleta resíduos em zonas rurais, os veículos têm de percorrer distâncias mais longas para recolher quantidades de resíduos que em zonas urbanas seriam recolhidas em menores distâncias. Quando tais situações ocorrem, a empresa necessita de projetar as rotas de modo a minimizar as distâncias percorridas, ao mesmo tempo que se garante que uma quantidade mínima de resíduos é recolhida. Outros objetivos que constituem interesse são a maximização da quantidade de resíduos que é recolhida durante rotas independentemente da distância percorrida, ou a minimização do número de veículos necessários para efetuar as coletas, para redução extra de custos. Outras vezes é necessário recolher mais contentores do que o habitual, e o objetivo passa a ser maximizar o número de contentores recolhidos por rota. Outros objetivos podem ser formulados de acordo com as necessidades e requisitos que são apresentados aos agentes de decisão. Existem momentos em que o AD terá dificuldade em escolher a melhor estratégia para uma dada situação, e assim que se consideram os indicadores de desempenho, surgem objetivos em conflito. Lidar com estas

situações e decidir qual a solução mais adequada a aplicar de modo a cumprir os valores estipulados para os indicadores de desempenho pode tornar-se uma tarefa complexa e morosa. O AD pode recorrer a métodos de análise de decisão multi-critério (ADMC) para pesar a importância de cada indicador de desempenho em relação aos outros, processar informação mais rápido e obter as soluções de otimização de rotas recolha mais apropriadas para cada situação.

7.2 Diferentes objetivos para o encaminhamento de veículos

As empresas que efetuam recolha de resíduos tem normalmente uma preocupação em determinar o quão eficientes são as suas estratégias tático-operacionais e o quanto estas podem ser melhoradas. Muitas empresas aplicam rotas e agendamentos de recolha fixos, pois permitem simplificar a gestão de recursos. No entanto são práticas pouco eficientes. Otimizar rotas de recolha de acordo com objetivos específicos pode traduzir-se em poupanças significativas nos custos operacionais e de manutenção dos recursos. Para se poder implementar melhores práticas de gestão de recursos é necessário recorrer a algoritmos de planeamento de rotas (encaminhamento de veículos) e/ou sistemas de apoio à decisão.

Na recolha de resíduos para reciclagem, a definição de objetivos é crucial quando se efetua o planeamento de rotas, pois existem metas importantes a cumprir. Por exemplo, um objetivo comum é a minimização das distâncias percorridas, pois traduz-se em menores consumos de combustível, menor desgaste dos veículos e menos emissões de gases poluentes. Para o estudo que se pretende efetuar sobre a aplicação de métodos ADMC à recolha de RED foi consultada a empresa Braval a propósito de se definir uma lista de objetivos importantes que devem ser considerados para se atingir rotas mais eficientes e que envolvem menores custos. Os objetivos definidos são os seguintes:

- Minimizar distância total percorrida – MinD;
- Maximizar quantidade total recolhida – MaxQ;
- Maximizar Performance - MaxP (*Performance* = Quantidade / Distância);
- Maximizar total de contentores recolhidos – MaxC;
- Minimizar total de veículos utilizados – MinV;
- Maximizar total de contentores prioritários recolhidos – MaxPP.

7.3 Critérios e indicadores de desempenho no contexto da recolha de resíduos para reciclagem

O processo de planeamento de rotas depende da utilização de ferramentas de *software* e algoritmos que produzam soluções de encaminhamento de veículos. Entenda-se o termo solução como um conjunto de rotas otimizadas que podem ser atribuídas a uma frota de veículos. A qualidade das soluções necessita de ser avaliada tendo em consideração a importância de indicadores de desempenho (ID). Os ID definidos são vistos como critérios que influenciam o planeamento de rotas. Para o caso da recolha de RED definiu-se um conjunto de ID que são do tipo quantitativo, o que facilita de certo modo as comparações feitas quando se aplicam métodos de ADMC. Definiu-se um total de 12 ID os quais são listados em seguida:

- Distância percorrida na solução;
- Distância média percorrida por rota;
- Quantidade recolhida na solução;
- Quantidade média recolhida por rota;
- Performance da solução;
- Performance média por rota;
- Total de contentores recolhidos por solução;
- Média de contentores recolhidos por rota;
- Total de veículos utilizados na solução;
- Total de pontos de prioridade recolhidos na solução;
- Média de pontos de prioridade recolhidos por rota;
- Total de contentores prioritários recolhidos na solução;

7.4 Metodologias adoptadas e ferramentas utilizadas

7.4.1 Descrição do *software* adotado e melhoramentos efetuados

Existem inúmeros métodos de ADMC diferentes, e existem igualmente várias ferramentas de *software* que implementam métodos ADMC. Weistroffer et al. [111] fez um levantamento das ferramentas existentes e métodos nelas implementados. Em 2010, Seixedo e Tereso [89] atualizaram a lista de ferramentas referidas por Weistroffer et al. [111], e desenvolveram um *software* de apoio à decisão multi-critério para seleccionar *software* ADMC com base no método

AHP (*analytic hierarchy process*). Em 2011, Tereso et al. [101] apresentou uma versão melhorada do *software*, o qual se passou a designar por beSmart [17]. O beSmart foi concebido como uma aplicação de propósito generalista capaz de processar dados relativos a qualquer problema que implique decisão multi-critério, e permite obter soluções com base em métodos ADMC. Pela sua flexibilidade de aplicação, o beSmart foi escolhido para integrar o sistema de apoio à decisão que se pretende desenvolver nesta investigação.

Apesar do beSmart se encontrar num bom nível de desenvolvimento, necessitava de algumas melhorias para proporcionar uma melhor interação com o utilizador. Foram feitas alterações à interface gráfica de utilizador, de modo a apresentar as opções e comandos do beSmart para utilização mas intuitiva e organizada. Foram incluídas mais informações de utilização em cada uma das fases do processo de tomada de decisão. Também se melhorou a forma como se apresentam as soluções no painel final de solução do beSmart, melhorando o aspeto e posicionamento de tabelas e gráficos, bem como a qualidade da informação neles contida. Também se adicionou a opção de efetuar análise de sensibilidade.

7.4.2 Métodos ADMC utilizados

Existem três métodos de ADMC implementados no beSmart: 1) SMART, 2) AHP, e 3) ValueFn. O método SMART [32] consiste em atribuir uma pontuação a cada critério, e quanto maior a pontuação, mais importância tem o critério. No AHP [87] ocorre uma estruturação do problema, sendo decomposto em sub-problemas (critérios). Depois, o AD avalia a importância relativa atribuída a cada critério por comparação de pares, onde o nível de importância de um critério é atribuído em relação a outro critério. O método AHP converte estas avaliações em valores numéricos designados por pesos ou prioridades, e são usados para calcular uma pontuação para cada alternativa de solução. Uma taxa de consistência mede até que ponto o AD foi consistente nas comparações que fez entre critérios. A taxa de consistência deve ser inferior ao valor 0,1. No método ValueFn [24][55] a avaliação das soluções alternativas é diretamente transformada numa função, que pode ser uma função de maximização ou minimização, conforme a intenção do AD em querer maximizar ou minimizar um atributo.

Mais informações e explicações detalhadas sobre como estes métodos de ADMC foram implementados no beSmart estão disponíveis em [89] e [101].

7.5 Processo de apoio à tomada de decisão

O *software* beSmart pode auxiliar na seleção da melhor solução para um determinado cenário operacional de recolha de resíduos em que o AD necessita de pesar a importância de cada indicador de desempenho. O processo de decisão no beSmart ocorre ao longo de cinco passos que estão apresentados na Figura 49.

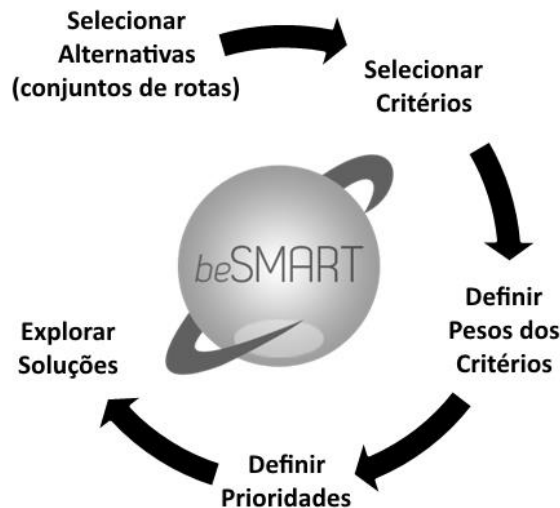


Figura 49 – Os cinco passos do processo de decisão no beSmart.

O primeiro passo do processo de decisão consiste em selecionar as alternativas que se pretendem comparar, que neste caso são os conjuntos de rotas ou soluções (ver Figura 50). Cada solução resulta da aplicação de cada função-objetivo diferente que é usada no módulo de otimização de rotas.

A captura de tela mostra a interface do **beSMART Software** com o menu **Choose Software** selecionado. A tabela abaixo apresenta a lista de alternativas disponíveis para seleção:

ID	Name	Link	Link	Link	Link	Total Distance	Average Distance	Total Quantity	Average Quantity	Total Performance	Average Performance	Total Ecopton
<input checked="" type="checkbox"/>	1	Maximize Priority Points				557	186	59515	19838	107	36	32
<input type="checkbox"/>	2	Minimize Distance				435	145	56790	18930	131	44	27
<input type="checkbox"/>	3	Maximize Quantity				527	176	59840	19947	114	38	30
<input type="checkbox"/>	4	Maximize Performance				475	158	57840	19280	122	41	28
<input type="checkbox"/>	5	Maximize EcoPontos				543	181	59190	19730	109	36	31
<input type="checkbox"/>	6	Minimize Vehicles				353	177	39945	19973	113	57	16

Na parte inferior da janela, há uma caixa de instruções para a nova comparação:

For new Comparison:
1 - Software -> Start New Comparison (Ctrl+N)
2 - Choose between 2 up 16 software you want to be part of the decision process.
3 - Click Next.

Abotoes de navegação: **View Software WebPage** e **Next >**

Figura 50 - Seleção de alternativas de solução no beSmart.

No segundo passo de decisão, o AD escolhe quais os ID que considera importantes para a avaliação das soluções (Figura 51). Segue-se o terceiro passo, durante o qual ocorre a definição dos pesos, ou seja, o AD expressa a importância relativa de cada ID usando os métodos SMART ou AHP (Figura 52). Assim, o AD atribui valores a cada ID de modo a denotar a importância relativa deste em relação a cada um dos outros ID separadamente.

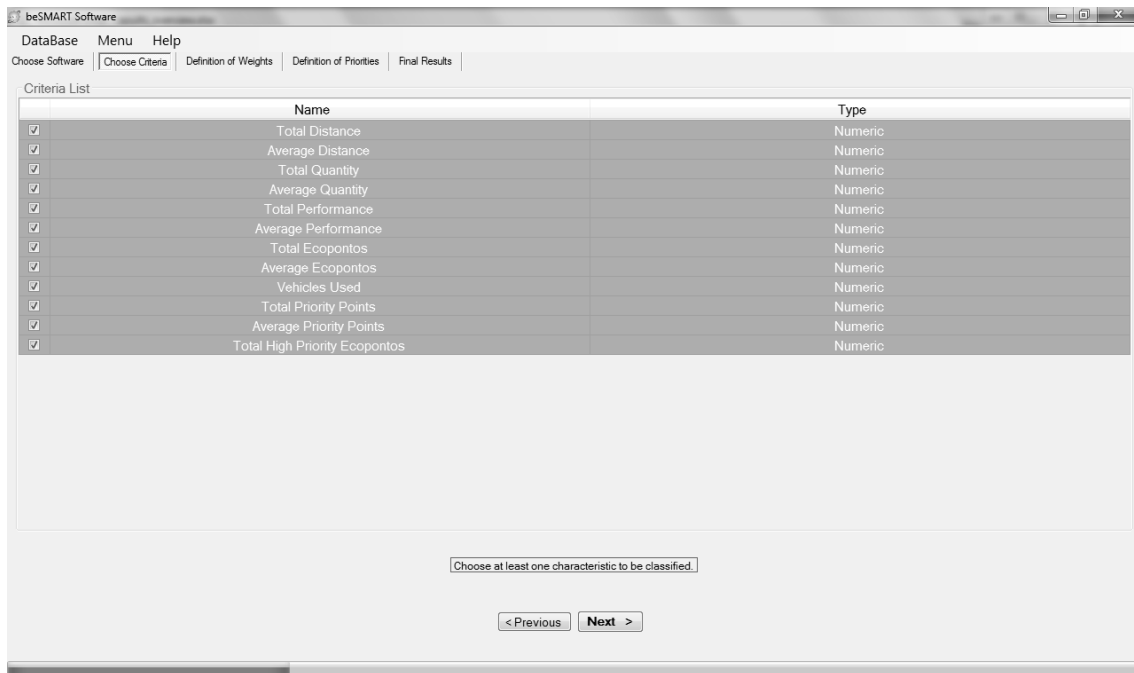


Figura 51 - Seleção de critérios no beSmart.

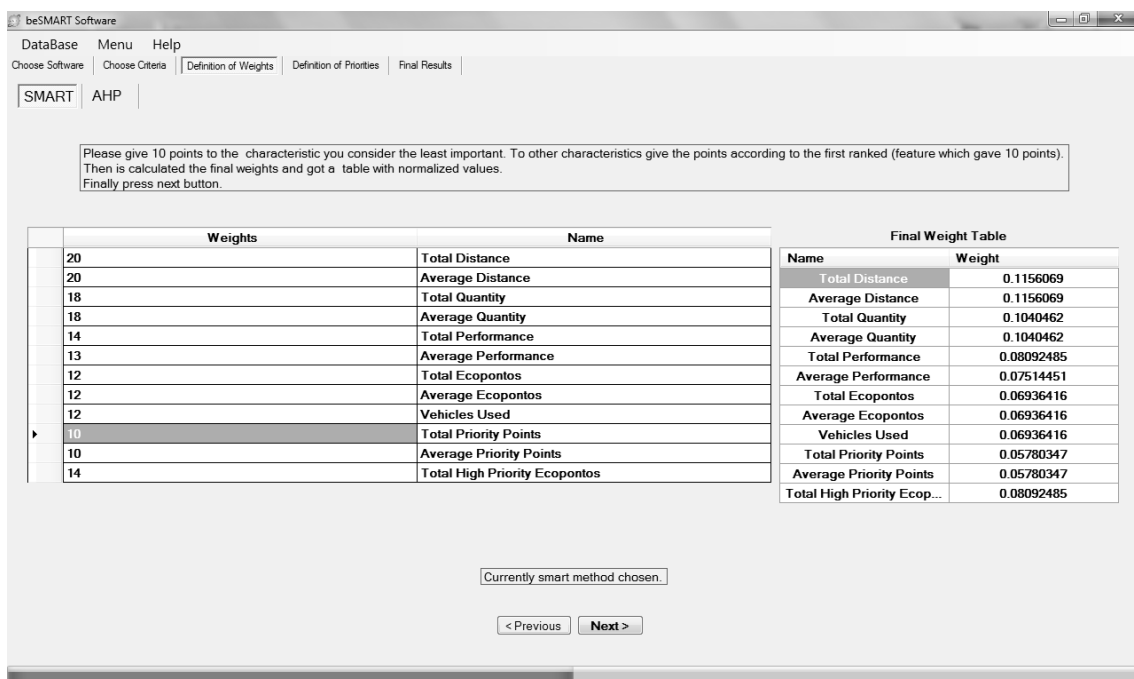


Figura 52 - Aplicação do método SMART na definição dos pesos dos critérios.

O quarto passo incide da definição das prioridades, e usando os métodos AHP (Figura 53) ou ValueFn (Figura 54) pode-se determinar o nível de prioridade que cada ID representa para cada solução. Por fim, no quinto passo, os resultados das comparações são apresentados no painel final sob a forma de tabelas e gráficos. Nesta fase é possível realizar uma análise de sensibilidade em tempo real para os ID selecionados. Esta análise permite ao AD examinar o impacto que causa a mudança dos níveis de prioridade atribuídos a cada ID. É ainda no painel final que o beSmart indica qual a melhor solução de entre todas as alternativas comparadas, e todas são apresentadas numa lista ordenada da solução mais adequada à menos adequada.

A utilização do beSmart permite ao AD ficar mais consciente das possibilidades de solução e dos seus resultados para o problema sob análise.

This table pretends to describe the relation between all characteristics chosen. The main diagonal of the table associates the same two characteristics, so is automatically filled. Here you have to fill in the part of the table above the main diagonal, and give points to each criterion concerning other. You may adopt your own scale or consider the scale described in AHP Tutorial. The part of the table below the main diagonal is automatically fill in with the inverse values previously assigned. Then is calculate final weights and got a table with normalized values, named final weight matrix. After that, is estimated the consistency rate of this matrix. If the value of consistency is good (written in green), you can proceed. If the consistency is bad (written in red), you should change the values to get a better result, or proceed anyway.

	Best Software	Total Distance	Average Distance	Total Quantity	Average Quantity	Total Performance	Average Performance	Total Ecopontos	Average Ecopontos	Vehicles Used	Total Priority Points	Average Priority Points	Total High Priority
Total ...	1	1	2	2	5	6	7	7	7	7	9	9	5
Avera...	1	1	2	2	5	6	7	7	7	9	9	9	5
Total ...	0.5	0.5	1	1	3	4	5	5	5	7	7	7	3
Avera...	0.5	0.5	1	1	3	4	5	5	5	7	7	7	3
Total ...	0.2	0.2	0.3333...	0.3333...	1	2	3	3	3	3	5	5	1
Avera...	0.1666...	0.1666...	0.25	0.25	0.5	1	2	2	2	2	4	4	0.5
Total ...	0.1428...	0.1428...	0.2	0.2	0.3333...	0.5	1	1	1	1	3	3	0.25
Avera...	0.1428...	0.1428...	0.2	0.2	0.3333...	0.5	1	1	1	1	3	3	0.25
Vehicl...	0.1428...	0.1428...	0.2	0.2	0.3333...	0.5	1	1	1	1	3	3	0.25
Total ...	0.1111...	0.1111...	0.1428...	0.1428...	0.2	0.25	0.3333...	0.3333...	0.3333...	1	1	1	0.17
Avera...	0.1111...	0.1111...	0.1428...	0.1428...	0.2	0.25	0.3333...	0.3333...	0.3333...	1	1	1	0.17
Total ...	0.2	0.2	0.3333...	0.3333...	1	2	4	4	4	4	5.8823...	5.8823...	1

Name	Weight
Total Distance	0.2166081
Average Distance	0.2166081
Total Quantity	0.133037
Average Quantity	0.133037
Total Performance	0.06448986
Average Perform...	0.04438777
Total Ecopontos	0.02937661
Average Ecopon...	0.02937661

Consistency Rate
0.030

Currently AHP method chosen.

< Previous Next >

Figura 53 - Aplicação do método AHP.

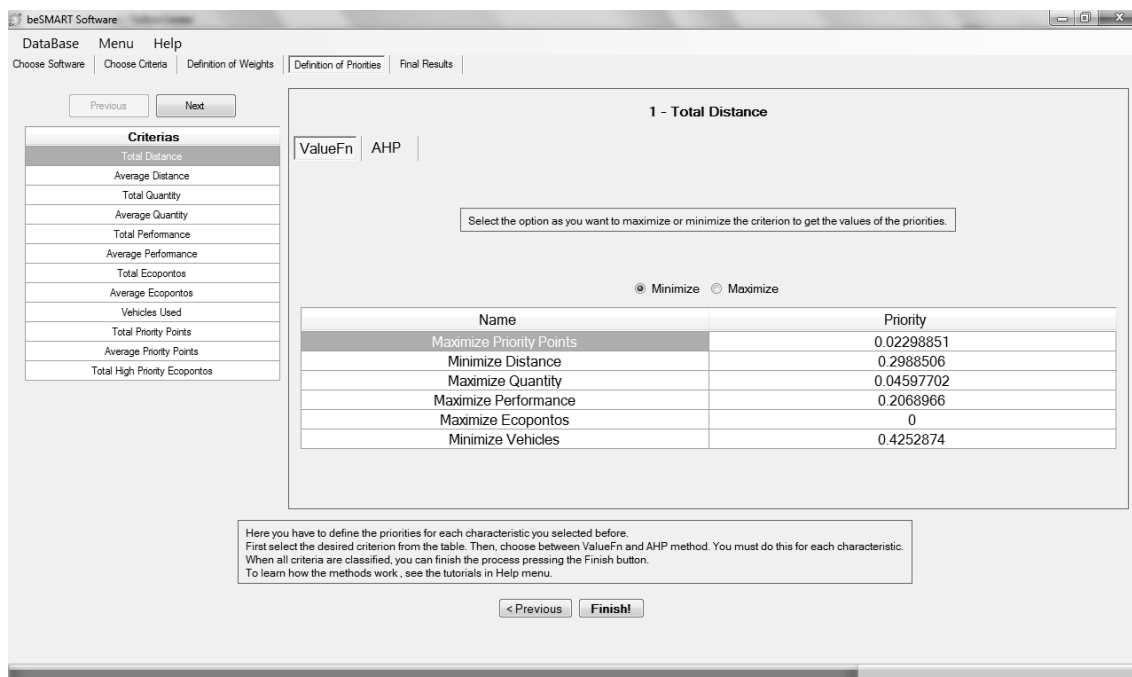


Figura 54- Aplicação do método ValueFn.

7.6 Experiências realizadas e conclusões

A avaliação da aplicação de métodos ADMC foi feita com base em dados reais da recolha de resíduos efetuada pela Braval. Com base nesses dados construíram-se 10 instâncias do tipo CTOPTW, com o intuito de simular recolhas para dias específicos, sabendo à partida que tipo de veículos serão utilizados. Com as experiências pretende-se comprovar a utilidade da ADMC para se cumprirem diferentes metas no contexto da recolha de resíduos.

Utilizando algoritmo de encaminhamento de veículos, foram executadas as 10 instâncias considerando três veículos disponíveis com capacidade de $20 m^3$, e foram determinadas rotas para cada uma das funções-objetivo em separado. Algumas restrições globais foram aplicadas tais como: duração máxima de cada rota, distância máxima por rota, quantidade mínima a recolher por rota, e quantidade mínima a recolher por solução.

O algoritmo de otimização de rotas executou cada instância cinco vezes para cada uma das seis funções-objetivo, tendo sido selecionadas as que apresentaram melhores resultados para cada uma dessas funções. Em cada instância e para cada solução obtida foram determinados os valores de cada ID, e todos os dados foram guardados num ficheiro de formato próprio do *software* beSmart. Uma vez carregados os dados para o beSmart, tomou lugar o processo de análise multi-critério, onde se consideraram os 12 ID propostos anteriormente. No entanto, o

beSmart é capaz de lidar com um máximo de 16 critérios para resolver problemas de tomada de decisão.

Em termos de métodos ADMC utilizados, optou-se por aplicar o método SMART no passo de definição dos pesos dos critérios, enquanto na definição das prioridades se efetuou uma aplicação mista dos métodos AHP e ValueFn, escolhendo-se o método que se afigurava mais apropriado para cada tipo de critério

Um exemplo de solução alcançada para uma instância com o beSmart é apresentado na Figura 55. Na área superior-esquerda do painel é apresentado o *ranking* final das soluções, onde na primeira posição se encontra a solução mais adequada. Na área inferior-esquerda está disponível o componente de análise de sensibilidade. Na área inferior-direita, encontram-se gráficos de barras que detalham a forma como o peso de cada critério contribuiu para o *ranking* de cada solução. No caso apresentado na Figura 55 é indicado que a melhor solução é a maximiza a *performance* (MaxP). Porém, se o AD expressar outras preferências e/ou aplicar os métodos de ADMC de outra forma, soluções diferentes serão escolhidas como mais adequadas.

Durante os testes foram identificadas soluções que dão resposta a necessidades específicas das empresas que recolhem RED para reciclagem. No geral, o *software* beSmart é capaz de auxiliar os agentes de decisão a analisar a influência de vários critérios ao mesmo tempo, pesando as suas contribuições para se atingir certos níveis de desempenho.

beSMART Software

DataBase Menu Help

Choose Solutions | Choose Criteria | Definition of Weights | Definition of Priorities | Final Results

RANK	Objective Function	Priority
1	Minimize Distance	24.65 %
2	Minimize Vehicles	22.25 %
3	Maximize Performance	20.40 %
4	Maximize Quantity	13.38 %
5	Maximize Priority Points	10.17 %
6	Maximize Ecopontos	9.15 %

Minimize Distance

Objective Function	Value
Minimize Distance	0.2465293
Minimize Vehicles	0.2224572
Maximize Perform...	0.2040371
Maximize Quantity	0.1338185
Maximize Priority ...	0.1016978
Maximize Ecopon...	0.09146011

Objective Function	Priority	Calculations
Total Distance	21.66 %	0.50 %
Maximize Priority Points	2.30 %	6.47 %
Minimize Distance	29.89 %	1.00 %
Maximize Quantity	4.60 %	4.48 %
Maximize Performance	20.69 %	0.00 %
Maximize Ecopontos	0.00 %	9.21 %
Minimize Vehicles	42.53 %	
Average Distance	21.66 %	
Maximize Priority Points	3.17 %	0.69 %
Minimize Distance	41.27 %	8.94 %
Maximize Quantity	7.94 %	1.72 %
Maximize Performance	28.57 %	6.19 %
Maximize Ecopontos	0.00 %	0.00 %
Minimize Vehicles	19.05 %	4.13 %

Total Partial

Start New Comparison

Figura 55 – Exemplo de painel final do beSmart para explorar soluções.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

8.1 Conclusões gerais

O trabalho de investigação apresentado nesta tese incidiu no desenvolvimento de várias ferramentas para promover a otimização do processo de recolha de resíduos, no sentido de melhorar o desempenho em termos de gestão eficaz de recursos e redução dos custos associados. No âmbito da recolha de resíduos, o problema que foi selecionado para o estudo de novos métodos de solução foi um problema de encaminhamento de veículos (PEV) identificado no processo de recolha de resíduos de embalagens domésticas (RED) para reciclagem. O processo de recolha de RED para efeitos de reciclagem centra-se na gestão de recursos como veículos, pontos de recolha (ecopontos) e tempo dedicado às recolhas. A investigação foi desenvolvida com base num caso de estudo de uma empresa chamada Braval que efetua recolha de RED em seis concelhos do distrito de Braga, em Portugal.

Este trabalho de investigação foi elaborado em torno de quatro tarefas principais: 1) previsão da geração de resíduos; 2) otimização do encaminhamento de veículos para recolha de RED; 3) agendamento das rotas de recolha e dos contentores de ecoponto a recolher; 4) aplicação da análise de decisão multi-critério na gestão da recolha de resíduos. Em cada uma das tarefas foram desenvolvidas ferramentas que incluem abordagens inovadoras para a resolução de problemas associados à recolha de RED. As diferentes tarefas realizadas abordam problemas de diferentes naturezas, mas que estão intimamente relacionados, uma vez que a qualidade das soluções obtidas numa das tarefas afeta a qualidade das soluções nas restantes tarefas. Na tarefa da previsão da geração de resíduos pretendeu-se desenvolver modelos para efetuar previsões do estado de enchimento dos contentores que constituem os ecopontos (papelões, embalões e vidrões), e determinar o ritmo a que os resíduos vão sendo depositados nesses contentores. Ao efetuar previsões com elevada exatidão, é possível planear com maior eficiência as rotas dos veículos que recolhem os resíduos nos ecopontos. Essa eficiência advém da elaboração de um agendamento das recolhas que permita utilizar os veículos de forma a recolher os resíduos num momento em que os contentores nos ecopontos se encontram num nível de enchimento elevado, que justifica melhor a deslocação a esses ecopontos. Uma vez

obtido um agendamento eficiente das recolhas, o passo seguinte assenta na otimização das rotas de recolha, onde normalmente o foco está em cada dia visitar o máximo de ecopontos que apresentam uma urgência elevada de recolha dos resíduos, enquanto se procura minimizar as distâncias percorridas durante cada rota, de modo a reduzir os custos com combustível e manutenção dos veículos que efetuam as recolhas. No entanto, nem sempre se pretende elaborar um agendamento de recolhas focado nos mesmos objetivos. Muitas vezes surgem situações que implicam mudanças na estratégia da recolha de resíduos, e a otimização das rotas pode ter de considerar restrições adicionais ou ter de produzir soluções que cumpram certos valores mínimos em indicadores de desempenho (critérios). De modo a auxiliar a decisão sobre a escolha da melhor estratégia de recolha a seguir numa situação mais específica, propõe-se a aplicação de métodos de análise de decisão multi-critério (ADMC). Os métodos de ADCMC são ferramentas que permitem analisar diferentes soluções para um mesmo problema, enquanto se avaliam diferentes critérios que condicionam a decisão. Após o processo de análise ser concluído, é possível identificar a solução que permite obter o melhor desempenho para uma situação que obriga a cumprir critérios específicos.

Na tarefa da previsão da geração de resíduos o objetivo consistiu em desenvolver um método para prever o número de recolhas por ano (RPA) de cada contentor de ecoponto. Para tal, optou-se por explorar duas metodologias diferentes, em que uma assenta na elaboração de modelos de regressão linear múltipla (RLM), e a outra se baseia na aplicação de redes neuronais artificiais (RNA). A RLM constitui uma abordagem mais clássica e muito usada no âmbito das técnicas de previsão, enquanto as redes neuronais se têm vindo a afirmar ao longo das últimas décadas como um método robusto que permite altos desempenhos. Antes de desenvolver os modelos de previsão com as duas metodologias, foi necessário determinar uma série de fatores que potencialmente permitem explicar o ritmo a que se acumulam resíduos nos contentores de ecopontos. Foram propostos fatores relacionados com a população com carácter demográfico, social e económico. Também foram considerados fatores relacionados com os ecopontos e os seus contentores, mais especificamente características físicas como posicionamento, capacidade, tipo de estrutura, entre outras. Os fatores propostos foram testados na elaboração dos modelos de previsão. Os dois métodos de solução permitiram desenvolver modelos de previsão com bom nível de exatidão. Ambas as abordagens de solução serviram também para identificar os fatores que têm maior importância para explicar a geração de resíduos quando se pretende efetuar previsões do número de recolhas anuais (RPA) para cada contentor de

ecoponto. Por comparação direta dos desempenhos dos modelos de RLM e RNA, nenhuma das metodologias se destaca como a melhor solução global, sendo os modelos de RLM mais indicados para efetuar a previsão de RPA para vidrões, e os modelos RNA para prever RPA de embalões. Em relação à previsão de RPA para papelões, considera-se que ambas as metodologias são opções válidas e equiparáveis em termos de desempenho.

Também se testaram duas hipóteses para obter um modelo de previsão mais exato, em que uma delas consistiu em criar um modelo híbrido, onde se combinaram as previsões obtidas com as duas metodologias. A outra hipótese de melhoria assentou na determinação de um fator de correção sazonal para as previsões acompanharem melhor as variações no ritmo de geração de resíduos. O modelo híbrido permitiu baixar o erro de previsão em termos de desvio absoluto médio apenas para o caso da geração de resíduos em papelões e embalões. A aplicação do fator de correção sazonal permitiu identificar o modelo de RLM como mais adequado para efetuar previsões do número de recolhas a efetuar em cada mês do ano, para cada contentor de ecoponto.

Relativamente à tarefa da otimização do encaminhamento de veículos, um objetivo incidiu no desenvolvimento de um método para executar agendamentos de recolhas que permitam distribuir as visitas previstas a ecopontos pelas rotas atribuídas a veículos. Outro objetivo passou pelo desenvolvimento de um método de otimização de rotas que permita alcançar um objetivo específico ao mesmo tempo que cumprem certas restrições ou limitações impostas pelo problema.

O método de agendamento tem como ponto de partida a previsão do ritmo de enchimento dos contentores de ecopontos, e a partir da qual se efetua uma projeção dos intervalos de tempo ideais para recolher os resíduos acumulados em cada contentor ao longo de um certo período de tempo.

Antes de desenvolver um método de otimização de rotas foi necessário modelar o problema de encaminhamento de veículos identificado no âmbito do processo da recolha de RED. A recolha de RED tem um carácter seletivo, na medida em que nem sempre é possível visitar todos os contentores previstos recolher em cada dia. Assim, o tradicional modelo do VRP (*vehicle routing problem*) não se apresenta como uma opção apropriada ao problema em questão, pois impõe uma obrigatoriedade em visitar todos os locais elegíveis para recolha. Além disso, no VRP não existe um limite imposto ao número de veículos que se podem utilizar, pois segundo este modelo uma solução só é válida se todos locais são visitados, e são utilizados tantos veículos

quantos os necessários para cumprir essa imposição. Assim, a modelação do problema seguiu as linhas condutoras de um modelo mais flexível que o VRP e mais adequado às restrições base do problema real estudado. O modelo escolhido foi o *team orienteering problem* (TOP). O TOP engloba variantes que consideram restrições de capacidade (CTOP) e de janelas temporais (TOPTW). Com base no TOP e nessas variantes, desenvolveram-se modelos mais complexos que integram as limitações mais específicas impostas pela empresa Braval para realizar a recolha de resíduos. Desenvolveram-se quatro novos modelos com base no TOP que não constam na literatura: 1) TOP com janelas temporais para vértices e veículos e restrição de capacidade (CTOPdTW), 2) CTOPdTW com recolha multi-produto (CTOPTW-MPC), 3) CTOPdTW com frota heterogénea (CTOPdTW-HF), e 4) CTOPdTW-MPC-HF que combina recolha multi-produto e frota heterogénea.

Após a fase de modelação, avançou-se com o desenvolvimento do método de otimização de rotas. A metodologia adotada foi a dos algoritmos genéticos (AG). Desenvolveram-se AG do tipo geracional (AGG) e do tipo celular (AGC), e ambos os métodos foram avaliados quanto ao seu desempenho na resolução de problemas do tipo TOP, CTOP e TOPTW que são usados frequentemente como medida de comparação entre os métodos de resolução presentes na literatura da área. Após testar os AG nesses problemas, concluiu-se que o método de otimização de rotas globalmente mais eficiente foi o AGC.

Os testes de validação com o método de agendamento assentaram na simulação de situações reais de recolha de resíduos que foram realizadas pela Braval num período de 31 dias referentes o mês de outubro de 2013. Explorou-se a aplicação de diferentes modelos de encaminhamento de veículos, e o método de otimização de rotas usado foi o AGC. Os resultados alcançados no agendamento de recolhas de papelões, embalões e vidrões validaram a utilidade dos métodos desenvolvidos, pois para o período de recolhas simulado, o desempenho foi superior à atuação da Braval em termos de distâncias percorridas, o que se traduziu em menores consumos de combustível, e apontam para possíveis reduções de até 49% nos custos operacionais no caso da recolha conjunta de papelões e embalões, e de 9% no caso da recolha de vidrões. Também se demonstrou que para um mesmo período de agendamento de recolhas e com as referidas reduções nos custos operacionais, é possível recolher mais 34% de papelões, mais 40% de vidrões e o mesmo número de embalões que a Braval.

Uma consequência da aplicação do método de agendamento foi a redução da duração do processo da recolha para o período de tempo simulado, que foi cerca de 11 horas a menos do que a atuação da Braval para o período de planeamento escolhido. O tempo poupado pode ser aplicado para realizar recolhas em outros concelhos, ou pode ser despendido em outras tarefas que os tripulantes dos camiões (condutores e ajudantes) executam para além da recolha de resíduos.

Um dos objetivos desta investigação consistiu no desenvolvimento de ferramentas de análise de decisão multicritério (ADMC) para serem aplicadas no contexto da recolha de resíduos. A aplicação de ADMC é útil quando existem vários critérios a considerar para a escolher uma única solução de entre um conjunto de soluções alternativas, tendo em vista alcançar uma ou mais metas definidas. No âmbito da recolha de RED podem surgir situações que imprimem alterações nas metas previamente estabelecidas na estratégia de uma empresa que gere a recolha de RED, e deve conseguir dar resposta a essas situações, adaptando a sua atuação de modo a concretizar diferentes objetivos enquanto se cumprem valores estabelecidos para os indicadores de desempenho (critérios). Nestas situações existem diferentes soluções que precisam de ser avaliadas à luz desses critérios, e uma decisão deve ser feita de modo a escolher a solução mais apropriada para uma determinada situação. Para resolver problemas de decisão deste tipo, foram apresentados métodos de ADMC que foram implementados numa ferramenta de *software* chamada beSmart: O *software* beSmart possui um interface gráfico com o qual um agente de decisão (AD) pode interagir, exprimir as suas preferências sobre cada critério, e comparar um conjunto de soluções alternativas para um dado problema. A aplicação do beSmart a problemas reais de recolha de resíduos permitiu aferir e validar a sua utilidade. Esta abordagem de resolução elaborada para o problema da recolha de RED recebeu comentários positivos por parte da empresa Braval.

Globalmente pode-se afirmar que os objetivos propostos para esta investigação foram alcançados, uma vez que se desenvolveram com sucesso ferramentas para: 1) a previsão do estado de enchimento dos contentores de ecopontos e determinação do ritmo a que se depositam resíduos nos contentores; 2) a otimização das rotas de recolha; 3) o agendamento das rotas e dos contentores a recolher; 4) a aplicação de métodos de análise de decisão multicritério. As ferramentas de otimização de rotas e de agendamento podem ser utilizadas para execução diária, e não apenas para planeamento de recolhas para períodos de tempo mais

extensos. Todas ferramentas desenvolvidas foram englobadas num sistema de apoio à decisão que permite simular cenários no âmbito da recolha de resíduos, e alcançar soluções para esses cenários ao nível da gestão de recursos.

8.2 Contribuições científicas

Em termos de contribuições científicas, esta investigação inovou no desenvolvimento de modelos de previsão da geração de resíduos ao nível dos contentores de ecopontos. Também foram identificados fatores importantes que condicionam a geração de resíduos para a reciclagem.

Foram obtidas contribuições originais ao nível de algoritmos para problemas de encaminhamento de veículos como o *team orienteering problem* (TOP), com base na metodologia dos algoritmos genéticos. Foram ainda desenvolvidos modelos específicos com base no TOP para modelar o problema de encaminhamento de veículos identificado no processo de recolha de resíduos para reciclagem. Esta abordagem inovadora permitiu introduzir novas variantes do modelo TOP tais como: o *capacitated team orienteering problem with double time windows* (CTOPdTW), o *CTOPdTW with multi-product collection* (CTOPdTW-MPC), o *CTOPdTW with heterogeneous fleet* (CTOPdTW-HF) e ainda o *CTOPdTW with multi-product collection and heterogeneous fleet* (CTOPdTW-MPC-HF).

Outro conceito inovador apresentado nesta tese é a aplicação de métodos de análise de decisão multi-critério (ADMC) no contexto da gestão do processo de recolha de RED. Foi proposto um conjunto de seis funções-objetivo diferentes adequadas ao problema de encaminhamento de veículos presente na recolha de RED, que permitiram obter diferentes estratégias ou alternativas de solução para a recolha de RED. Também se propôs um conjunto de doze indicadores de desempenho neste contexto, os quais em termos de ADMC funcionam como critérios que são importantes considerar em momentos de decisão sobre a estratégia a adoptar em situações específicas da recolha de RED. A ferramenta de ADMC desenvolvida permite avaliar as diferentes alternativas de solução, pesando a importância de cada critério que é considerado, e determina a melhor alternativa de solução à luz das preferências que o agente de decisão expressa acerca de cada critério.

8.3 Aplicações práticas

No caso específico da empresa Braval, a importância de efetuar previsões da geração de resíduos reside no facto de que apenas os ecopontos subterrâneos possuem sistemas de telemetria que permitem determinar o estado de enchimento (em percentagem) de cada contentor. Contudo, este sistema é muito dispendioso, e por essa razão o número de ecopontos subterrâneos é inferior a 100, numa rede com um total superior a 1200 ecopontos. Assim, para abranger os ecopontos de superfície quando se pretendem obter previsões do ritmo de geração de resíduos, podem-se aplicar os modelos de previsão desenvolvidos nesta investigação.

Os modelos de previsão foram desenvolvidos com base em dados da recolha de RED em dois concelhos do distrito de Braga onde existe uma predominância de zonas rurais e peri-urbanas. Estas zonas rurais e peri-urbanas são as que apresentam melhor potencial para melhorias ao nível da eficiência da recolha de RED, uma vez que os ecopontos se encontram mais dispersos geograficamente, e mais afastados do ponto de retorno dos camiões de recolha (infraestruturas de tratamento de resíduos e/ou aterro). Deste modo, acredita-se que os modelos de previsão desenvolvidos nesta investigação terão uma aplicação mais eficaz e bem-sucedida em zonas rurais e peri-urbanas, que por sua vez são as zonas mais problemáticas para as empresas que gerem a recolha de RED.

Outras aplicações práticas dos modelos de previsão são: 1) a identificação de contentores de ecopontos que estejam mal dimensionados em termos de capacidade para harmonização dos ritmos de enchimento e de recolha; 2) a análise do impacto da mudança de localização de certos ecopontos; 3) análise do impacto da inclusão/remoção de ecopontos em novas localizações; 4) a previsão do número de recolhas anuais/mensais para empresas que não possuam sistemas de telemetria instalados nos seus ecopontos; 5) o projeto de redes de ecopontos e dimensionamento apropriado da capacidade dos contentores de ecopontos, uma vez que os modelos de previsão incluem como variáveis de entrada as características específicas dos contentores tais como capacidade e tipo (superfície ou subterrâneo).

As ferramentas de otimização de rotas de recolha permitem aumentar a eficiência das recolhas, permitindo percorrer menores distâncias, contribuindo para a redução dos custos em combustível. O método de agendamento de recolhas desenvolvido promove a minimização dos custos operacionais, e em conjunto com a ação das ferramentas de otimização de rotas permitem reduzir os custos operacionais da recolha de RED.

As ferramentas desenvolvidas para efetuar ADMC em conjunto com as ferramentas de otimização de rotas proporcionam diferentes opções de otimização e alternativas de solução para situações específicas no contexto da recolha de resíduos com base nas preferências do agente de decisão. Estas características são vantajosas pois no âmbito da gestão de resíduos por vezes há necessidade de alterar a estratégia de recolha para cumprir novas metas ou objetivos, enquanto se assegura o cumprimento de valores específicos dos indicadores de desempenho. Assim, as empresas de gestão de resíduos podem melhorar o seu desempenho geral ao nível da recolha de resíduos, através da exploração de rotinas de recolha mais eficientes que permitem uma melhor adaptação aos desafios que possam surgir ao longo do tempo.

8.4 Dificuldades

Ao longo desta investigação surgiram várias dificuldades, especialmente durante o desenvolvimento dos modelos de previsão da geração de resíduos.

Ambos os modelos de previsão de RLM e RNA não conseguiram explicar uma parte considerável (40% ou mais) das variáveis que se pretendiam estimar, provavelmente devido a um componente aleatório que não foi possível determinar usando o tipo de dados disponíveis. Inicialmente projetou-se que os modelos de previsão seriam desenvolvidos com base nos registos das quantidades de resíduos recolhidas em cada contentor de ecoponto individualmente. Porém, a empresa Braval não dispunha deste tipo de informação, mas sim de relatórios de recolha em formato não digital (papel) onde constam os níveis de enchimento dos contentores aquando dos seus esvaziamentos, numa escala de percentagem com cinco níveis: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. A determinação do nível de enchimento é feita por observação visual por parte da tripulação dos camiões de recolha, e por isso está sujeita a erros. Deste modo, foi necessário utilizar outro tipo de dados para desenvolver os modelos de previsão, e recorreu-se aos registos gerais das recolhas, onde para cada contentor de ecoponto constam os dias em que foi recolhido efetivamente, sem existir uma indicação do nível de enchimento. Como a Braval apenas recolhe um contentor se este está pelo menos 50% cheio, então uma recolha efetiva tanto pode corresponder a um contentor meio cheio como a um totalmente cheio. Esta incerteza afeta a exatidão dos modelos de previsão, pois ao prever o número de recolhas anuais ou mensais para os contentores, pode ocorrer subestimação ou sobrestimação, o que afeta posteriormente a eficiência operacional ao colocar em prática o método de agendamento das rotas de recolhas e dos contentores a recolher baseadas nas previsões. Havendo acesso a um

registo de dados mais acessível (formato digital), mais completo e rigoroso, será possível efetuar uma utilização mais eficaz da metodologia desenvolvida para a previsão da geração de resíduos.

8.5 Trabalho futuro

Em termos de trabalho futuro, existe margem para várias melhorias ao nível das ferramentas desenvolvidas nesta investigação. Uma abordagem que pode ser explorada é o desenvolvimento de um modelo para prever especificamente a quantidade de resíduos, em peso e/ou volume, que se acumula em cada um dos contentores de ecoponto, permitindo assim determinar o ritmo a que processa essa acumulação (ritmo de enchimento). Essa quantidade poderá ser expressa em forma de percentagem de enchimento em cinco níveis (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). O modelo de previsão deverá ser atualizado como um sistema retroalimentado, sendo adicionada nova informação ao longo do tempo de modo a tornar as previsões mais exatas, acompanhando as variações no ritmo de geração/acumulação de resíduos nos ecopontos.

Relativamente ao método de agendamento de recolhas que foi desenvolvido, é necessária uma aplicação num caso mais alargado, de modo a abranger o planeamento de recolhas para vários concelhos. Ao aplicar o método em simultâneo a vários concelhos, irão possivelmente surgir problemas relacionados com a disponibilidade dos veículos, a disponibilidade de utilização dos contentores de carga, possíveis zonas de recolha prioritária, entre outras situações adversas que tornam mais difícil a gestão de todos os recursos inerentes ao processo de recolha. Assim, será necessário melhorar o método de agendamento, tornando-o mais realista e capaz de lidar com situações mais complexas da recolha de RED. Também será necessário alterar o modelo desenvolvido para o problema de encaminhamento de veículos (PEV) de grande escala presente na recolha de RED, de modo a lidar com restrições adicionais e instâncias mais complexas. O método de resolução do PEV deve ser melhorado para poder resolver instâncias mais complexas em tempo útil. Uma via a explorar assenta na combinação de diferentes métodos heurísticos e metaheurísticos para se obter um método híbrido de resolução mais potente, como por exemplo um algoritmo genético combinado com uma técnica de pesquisa local (algoritmo memético).

Pretende-se que todas as ferramentas desenvolvidas nesta investigação sejam incorporadas num sistema informático, de modo a implementar o conceito de sistema de apoio à decisão (SAD) que foi proposto neste trabalho, e obter um *software* como produto final que pode ser utilizado pelas empresas que gerem a recolha de resíduos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abdoli, M., Nezhad, M., Sede, R., Behboudian, S. (2011). Longterm forecasting of solid waste generation by the artificial neural networks. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(4), 628-636.
- [2] Alba, E. e Dorronsoro, B. (2008). A Hybrid Cellular Genetic Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Engineering Evolutionary Intelligent Systems - Studies in Computational Intelligence*, 82, 379-422.
- [3] Alba, E. e Dorronsoro, B. (2004). Solving the Vehicle Routing Problem by Using Cellular Genetic Algorithms. Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. *Lecture Notes in Computer Science*, 3004, 11-20.
- [4] Alba, E., Giacobini, M., Tomassini, M., Romero, S. (2002). Comparing Synchronous and Asynchronous Cellular Genetic Algorithms. *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN VII, Lecture Notes in Computer Science*, 2439, 601-610.
- [5] Antanasijević, D., Pocajt, V., Popović, I., Redžić, N., Ristić, M. (2013). The forecasting of municipal waste generation using artificial neural networks and sustainability indicators. *Sustainability Science*, 8(1), 37-46.
- [6] Archetti, C., Bianchessi, N., Speranza, M.G. (2013). The capacitated team orienteering problem with incomplete service. *Optimization Letters*, 7, 1405-1417.
- [7] Archetti, C., Feillet, D., Hertz, A. e Speranza, M.G. (2009). The capacitated team orienteering and profitable tour problems. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 831–842.
- [8] Archetti, C., Hertz, A., e Speranza, M.G. (2007). Metaheuristics for the team orienteering problem. *Journal of Heuristics*, 13, 49-76.
- [9] Archetti, C., Bianchessi, N., Speranza, M.G., Hertz, A.. (2014). The Split Delivery Capacitated Team Orienteering Problem. *Networks*, 63(1), 16-33.
- [10] Bach, H., Mild, A., Natter, M., Weber, A. (2004). Combining socio-demographic and logistic factors to explain the generation and collection of waste paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 41 (2004) 65-73.
- [11] Bandara, N.J.G.J., Hettiaratchi, J.P.A., Wirasinghe, S.C., e Pilapiiya, S. (2007). Relation of waste generation and composition to socio-economic factors: a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 135(1–3), 31-39.

- [12] Bautista, J., Fernández, E., Pereira, J. (2008). Solving an urban waste collection problem using ants heuristics. *Computers & Operations Research*, 35, 3020-3033.
- [13] Beigl, P., Lebersorger, S., e Salhofer, S. (2008). Modelling municipal solid waste generation: A review. *Waste Management*, 28(1), 200-214.
- [14] Beijoco, A. (2011). *Otimização de um Sistema de Recolha e Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa: Lisboa, 98 pgs.
- [15] Beliën, J., Boeck, L.D., Ackere, J.V. (2014). Municipal solid waste collection and management problems: A literature review. *Transportation Science*, 48(1), 78-102.
- [16] Belton V. e Steward, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Boston (MA), USA: Kluwer.
- [17] BeSmart software development webpage (2015). Consultado em 22/04/2015, disponível em: <https://code.google.com/p/besmart/>
- [18] Bouly, H., Dang, D. e Moukrim, A. (2010). A Memetic Algorithm for the Team Orienteering Problem. *4OR*, 8, 49-70.
- [19] Boussier, S., Feillet, D. e Gendreau, M. (2007). An exact algorithm for team orienteering problems. *4OR*, 5, 211-230.
- [20] Braval. (2015). Consultado em 16/02/2015, disponível em: <http://www.braval.pt/>
- [21] BRKGA framework. (2015). Consultado em 17/03/2015, disponível em: https://github.com/richardf/brkga_binp
- [22] Buhrkal, K., Larsen, A., Ropke, S. (2012). The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 241-254.
- [23] Butt, S. E. e Cavalier, T. M. (1994). A heuristic for the multiple tour maximum collection problem. *Computers and Operations Research*, 21, 101-111.
- [24] Canada, J.R. e Sullivan, W.G. (1989). Economic and Multiattribute Evaluation of Advanced Manufacturing Systems. Prentice-Hall College Div. Chapter 9: Multiattribute Decision Analysis: utility models.
- [25] Cavar, I., Gold, H. e Caric, T. (2005). Assessment of Heuristic Algorithms for Solving Real Capacitated Vehicle Routing Problems by Analytic Hierarchy Process. Proceedings from ITS 2005 – 12th World Congress in Intelligent Transport Systems. San Francisco, CA.

- [26] Chao, I.M., Golden, B., e Wasil, E.A. (1996). The team orienteering problem. *European Journal of Operational Research*. 88, 474-474.
- [27] Christofides, N., Eilon, S. (1969). An exact algorithm for the vehicle-dispatching problem. *OR*, 309-318.
- [28] Cordeau, J.F., Gendreau, M., Laporte, G. (1997). A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, 30(2), 105-119.
- [29] CTOP - The capacitated team orienteering problem. (2015). Consultado em 12/11/2014, disponível em: <http://www.computational-logistics.org/orlib/topic/Capacitated%20TOP/>
- [30] Dang, D., Guibadj, R.N. e Moukrim, A. (2013). An effective PSO-inspired algorithm for the team orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, 229, 332–344
- [31] Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80–91.
- [32] Doran, G. T. (1981). There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives. *Management Review*, 70(11), 35-36.
- [33] Dorransoro, B. e Alba, E. (2008). Cellular Genetic Algorithms. *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, 42. Springer US
- [34] Encog Machine Learning Framework. (2015). Consultado em 12/02/2014, disponível em: <https://github.com/encog/>
- [35] Eurostat. (2015). Consultado em 17/07/2015, disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat>
- [36] Ferreira, J., Oliveira, J.A., Pereira, G.A.B., Dias, L., Vieira, F., Macedo, J., Carção, T., Leite, T., Murta, D. 2014. “Developing Tools for the Team Orienteering Problem - A Simple Genetic Algorithm”. *Soft Computing in Industrial Applications Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 223*, pp 365-375
- [37] Ferreira, J., Quintas, A. Oliveira, J.A., Pereira, G.A.B, Dias, L. (2012). Solving the Team Orienteering Problem: Developing a solution tool using a genetic algorithm approach. *Soft Computing in Industrial Applications - Advances in Intelligent Systems and Computing*, 223, 365-375.
- [38] Ferreira, J.A., Figueiredo, M.C. e Oliveira, J.A. (2014). Forecasting Household Packaging Waste Generation: A Case Study. *Computational Science and Its Applications - Lecture Notes in Computer Science*, 8581, 523-538.

- [39] GALib – A C++ Library of Genetic Algorithm Components. (2013). Consultado em 04/12/2012, disponível em: <http://lancet.mit.edu/ga/>
- [40] Ghoseiri, K. e Ghannadpour, S.F. (2010). Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 10(4) 1096–1107.
- [41] Gomes, A., Matos, M. e Carvalho, I. (2008). Separate collection of the biodegradable fraction of MSW: An economic assessment. *Waste Management*, 28, 1711-1719.
- [42] Grossman, D., Hudson, J.F., Mark, D.H., 1974. Waste generation methods for solid waste collection. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE 6, 1219–1230.
- [43] Heizer, J. e Render, B. (2004). *Operations management*. 7ª ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- [44] Hemmelmayr, V., Doerner, K.F., Hartl, R.F., Rath, S. (2013). A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. *Journal of Heuristics*, 19, 129-156.
- [45] Henke, T., Speranza, M.G., Wäscher, G. (2014). The multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. *European Journal of Operational Research*, 246(3), 730-743.
- [46] Hockett, D., Lober, D.J., Pilgrim, K., (1995). Determinants of per capita municipal solid waste generation in the Southeastern United States. *Journal of Environmental Management*, 45(3), 205-217.
- [47] Hu, Q. e Lim, A. (2014). An iterative three-component heuristic for the team orienteering problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 232, 276-286.
- [48] Hwang, H., Choi, B., Lee, K. e Cho, G. (2008). Supply Center Planning Model Using Fuzzy-AHP and VRP. Proceedings from ICICIC '08 - 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control, p.109.
- [49] JCELL Framework, (2013). Consultado em 14/06/2013, disponível em: <https://jcell.gforge.uni.lu/>
- [50] Jenkins, R.R. (1993). *The Economics of Solid Waste Reduction: The Impact of User Fees*. Aldershot, United Kingdom: Edward Elgar Publishing Limited.
- [51] Jolai, F. e Aghdaghi, M. (2008). A Goal Programming Model for Single Vehicle Routing Problem with Multiple Routes. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2(2), 154–163.

- [52] Karadimas, N.V., Kouzas, G., Anagnostopoulos, I., Loumos V. (2005). Urban Solid Waste Collection And Routing: The Ant Colony Strategic Approach. *Int. Journ. of Simulation*, 6(12-13), 45-53.
- [53] Karbowska-Chilińska, J., Zabielski, P. (2013). A Genetic Algorithm vs. Local Search Methods for Solving the Orienteering Problem in Large Networks. *Knowledge Engineering, Machine Learning and Lattice Computing with Applications, Lecture Notes in Computer Science*, 7828, 11-20.
- [54] Ke, L., Archetti, C., Feng, Z. (2008). Ants can solve the team orienteering problem. *Computers and Industrial Engineering*, 54, 648-665.
- [55] Keeney, R. e Raiffa, H. (1993). *Decision with Multiple Objectives: preferences and value tradeoffs*. Cambridge University Press.
- [56] Kim, B., Li, H., Johnson, A.L. (2013). An augmented large neighborhood search method for solving the team orienteering problem. *Expert Systems with Applications*, 40, 3065-3072.
- [57] Kim, B.I., Kim, S., Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers and Operations Research*, 33, 3624-3642.
- [58] Krause, E.F. (1987). *Taxicab Geometry: Na adventure in Non-Euclidean Geometry*. Dover.
- [59] Labadie, N., Melechovský, J., Calvo, R.W. (2011). Hybridized evolutionary local search algorithm for the team orienteering problem with time windows. *Journal of Heuristics*, 17, 729-753.
- [60] Labadie, N., Mansini, R., Melechovský, J., Calvo, R.W. (2012). The team orienteering problem with time windows: An lp-based granular variable neighborhood search. *European Journal Of Operational Research*, 220, 15-27.
- [61] Levenberg, K. (1944). A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.
- [62] Lin, S. (2013). Solving the team orienteering problem using effective multi-start simulated annealing. *Applied Soft Computing*, 13, 1064-1073.
- [63] Lin, S. e Yu, V. F. (2012). A simulated annealing heuristic for the team orienteering problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 217, 94-107.
- [64] Luo, Z., Cheang, B., Lim, A., Zhu, W. (2013). An adaptive ejection pool with toggle-rule diversification approach for the capacitated team orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, 229, 673–682

- [65] Makridakis, S. e Wheelwright, S.C. (1989). *Forecasting Methods for Management*. New York: 5th Edition WILEY John Wiley & Sons.
- [66] Marquardt, D. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.
- [67] Marquez, M.Y., Ojeda S., e Hidalgo, H. (2008). Identification of behavior patterns in household solid waste generation in Mexicali's city: Study case. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(11), 1299-1306.
- [68] McCulloch, W.S. e Pitts, W. H. (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5.
- [69] Montemanni R. e Gambardella L. (2009). Ant Colony System for Team Orienteering Problems with Time Windows. *Foundations of computing and decision sciences*, 34(4), 287-306.
- [70] Montemanni, R., Weyland, D., Gambardella, L.M., (2011). An Enhanced Ant Colony System for the Team Orienteering Problem with Time Windows. *Proceedings from ISCCS-2011 International Symposium on Computer Science and Society*, 381-384.
- [71] Noori, R., Abdoli, M.A., Jalili Ghazi Zade, M., Samieifard, R. (2009). Comparison of Neural Network and Principal Component Regression Analysis to Predict the Solid Waste Generation in Tehran. *Iranian Journal Public Health*, 38(1), 74-84.
- [72] Oliveira, J.A., João Ferreira, Manuel Figueiredo, Luis Dias e Guilherme Pereira. (2013). Comparação de dois algoritmos genéticos aplicados ao TOP. *Proceedings from XI Congresso Galego de Estatística e Investigación de Operacións*.
- [73] Oliveira, M. (2008). *Optimização de Circuitos de Recolha de Lixos Domésticos em Zonas Urbanas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto: Porto, 139 pgs.
- [74] Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., Bräysy, O. (2006). Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, 30, 223-232.
- [75] ParadisEO. (2012). Consultado em 18/09/2012, disponível em: <http://paradiseo.gforge.inria.fr/>
- [76] Ponto Verde. (2015). Consultado em 10/01/2015, disponível em: <http://www.pontoverde.pt/>
- [77] Rafiei, H., Rabbani, M., Vafa-Arani, H., Khoshnudi, N. (2013). A Heterogeneous Fleet Vehicle Waste Collection Problem with Various Zones and Intermediate Facilities. *International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology*, 2(5), 1251-1259.

- [78] Ramos, T. R. P., Gomes-Salema, M. I. e Barbosa-Póvoa, A. P. (2009). A multi-product, multi-depot vehicle routing problem in a reverse logistics system: comparative study of an exact formulation and a heuristic algorithm. *Proceedings from 14^o Congresso da APDIO - IO2009*, 195-202.
- [79] Ramos, T., Gomes, M.I., Barbosa-Póvoa, A.P. (2013). Planning waste cooking oil collection systems. *Waste Management*, 33, 1691-1703
- [80] Ramos, T., Gomes, M.I. e Barbosa-Póvoa, A.P. (2010). A Multi-product, Multi-depot Periodic Vehicle Routing Problem in a Reverse Logistics System. *Proceedings from POMS 21st Annual Conference*, 1-18. Vancouver, Canada.
- [81] Ries, J. e Ishizaka, A. (2012). A multi-criteria support system for dynamic aerial vehicle routing problems. *Proceedings from IEEE 2nd International Conference on Communications, Computing and Control Applications (CCCA)*, 1-4, Marseille.
- [82] Righini, G. e Salani, M. (2006). Dynamic programming for the orienteering problem with time windows. *Technical Report 91, Dipartimento di Tecnologie dell'Informazione, Università degli Studi Milano*. Crema, Italy.
- [83] Righini, G. e Salani, M. (2008). New dynamic programming algorithms for the Resource Constrained Elementary Shortest Path. *Networks*, 51(3), 155-170.
- [84] Rimaityte, I., Ruzgas, T., Denafas, G., Racys, V., Martuzevicius, D. (2012). Application and evaluation of forecasting methods for municipal solid waste generation in an eastern-European city. *Waste Management & Research*, 30(1), 89-98.
- [85] Rosenblatt, F. (1958). The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, 65(6), 386–408.
- [86] Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. e Williams, R.J. (1986). Learning Internal Representations by Error Propagation, *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*. MIT Press Cambridge, 1, MA, USA.
- [87] Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- [88] Sahoo, S., Kim, S., Kim, B. (2005). Routing Optimization for Waste Management. *Interfaces*, 35(1), 4-36
- [89] Seixedo, C. e Tereso, A. (2010). A Multicriteria Decision Aid Software Application for selecting MCDA Software using AHP. *Proceedings from 2nd International Conference on Engineering Optimization*. Lisbon, Portugal.

- [90] Sevkli, A.Z., Sevilgen, F.E. (2012). Discrete particle swarm optimization for the team orienteering problem. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 20(2), 231-239.
- [91] Shahabi, H., Khezri, S., Ahmad, B.B. and Zabihi, H. (2012). Application of Artificial Neural Network in Prediction of Municipal Solid Waste Generation. *World Applied Sciences Journal*, 20(2), 336-343.
- [92] Silva, R. (2009). *Optimização da Recolha de Resíduos Urbanos*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro: Aveiro, 100 pgs.
- [93] Solomon, M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints. *Operations Research*, 35, 254-265.
- [94] Souffriau, W., Vansteenwegen, P., Vanden Berghe, G. e Van Oudheusden, D. (2010). A Path Relinking Approach for the Team Orienteering Problem. *Computers & Operations Research. Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing*, 37(11), 1853-1859.
- [95] Souffriau, W., Vansteenwegen, P., Vanden Berghe, G., Van Oudheusden, D. (2013). The Multiconstraint Team Orienteering Problem with Multiple Time Windows. *Transportation Science*, 47, 53-63.
- [96] Tang, H. e Miller-Hooks, E. (2005). A tabu search heuristic for the team orienteering problem. *Computers and Operations Research*, 32, 1379-1407.
- [97] Tarantilis, C.D., Stavropoulou, F., Repoussis, P.P. (2013). The Capacitated Team Orienteering Problem: A Bi-level Filter-and-Fan method. *European Journal of Operational Research*, 224, 65-78.
- [98] Tavana, M. e Bourgeois, B.S. (2010). A multiple criteria decision support system for autonomous underwater vehicle mission planning and control. *International Journal of Operational Research*, 7(2), 216-239.
- [99] Tavana, M., Bailey, M.D. e Busch, T.E. (2008). A multi-criteria vehicle-target allocation assessment model for network-centric Joint Air Operations. *International Journal of Operational Research*, 3(3), 235-254.
- [100] Teixeira, J., Antunes A. P., Sousa J. P. (2004). Recyclable waste collection planning - a case study. *European Journal of Operational Research*, 158, 543-554.
- [101] Tereso, A., Sampaio, A., Frade, H., Costa, M. e Abreu, T. (2011). beSMART: a software tool to support the selection of decision software. *Proceedings from International Conference on Engineering UBI2011 (ICEUBI2011)*, Covilhã, Portugal.

- [102] The Orienteering Problem. Consultado em 17/06/2012, disponível em: <http://www.mech.kuleuven.be/en/cib/op/>
- [103] Toso, R.F. e Resende, M.G.C. (2015). A C++ application programming interface for biased random-key genetic algorithms. *Optimization Methods and Software*, 30(1), 81-93.
- [104] Tricoire, F., Romauch, M., Doerner, K.F., e Hartl, R.F. (2010). Heuristics for the multi-period orienteering problem with multiple time windows. *Comput. Oper. Res.*, 37(2), 351-367.
- [105] Tsiligirides, T. (1984). Heuristic Methods Applied to Orienteering. *The Journal of the Operational Research Society*, 35(9), 797-809.
- [106] Vale, M. (2009). *Determinação da frequência de recolhas aplicando técnicas de mineração de dados*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho: Braga, 85 pgs.
- [107] Vansteenwegen, P., Souffriau, W., Vanden Berghe, G. e Van Oudheusden, D., (2009). Iterated local search for the team orienteering problem with time windows. *Computers and Operations Research*, 36(12), 3281-3290.
- [108] Vansteenwegen, P., Souffriau, W., Vanden Berghe, G. e Van Oudheusden, D., Metaheuristics for tourist trip planning. Geiger, M., Habenicht, W., Sevoux, M., Sörensen, K. (Eds.). (2009). *Metaheuristics in the Service Industry*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 624, 15–31. Springer-Verlag.
- [109] Vansteewegen, P., Souffriau, W., Vanden Berghe, G. e Van Oudheusden, D. (2009). A guided local search metaheuristic for the team orienteering problem. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 118-127.
- [110] Wang, H.T. e Nie, Y.F. (2001). Municipal solid waste characteristics and management in China. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 51(2), 250-263.
- [111] Weistroffer, H.R., Smith, C.H. e Narula, S.C. Multiple Criteria Decision Support Software. Figueira J., Greco S. and Erghott M. (Eds.). (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Surveys*. Springer.
- [112] Yilmaz, Z. e Aplak, H.S., Vehicle routing by revaluing the alternative routes by using AHP-TOPSIS Combination. *Proceedings from X International Logistics & Supply Chain Congress 2012 Proceedings*, 304-310. İstanbul, Turkey
- [113] Zade, M. e Noori, R. (2008). Prediction of Municipal Solid Waste Generation by Use of Artificial Neural Network: A Case Study of Mashhad. *Int. J. Environ. Res.*, 2(1), 13-22.
- [114] Zak, J.: The MCDA methodology applied to solve complex transportation decision problems. *Proceedings from 13th Mini Euro Conference*. Bari, Italy.

ANEXOS

Anexos I

Tabela 98 - Resultados obtidos no conjunto 1 de instâncias de teste do TOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
p1.2.a	0	0	0	0	0	0	0
p1.2.b	15	15	15	15	15	15	15
p1.2.c	20	20	20	20	20	20	20
p1.2.d	30	30	30	30	30	30	30
p1.2.e	45	45	45	45	45	45	45
p1.2.f	80	80	80	80	80	80	80
p1.2.g	90	90	90	90	90	90	90
p1.2.h	110	110	110	110	110	110	110
p1.2.i	135	130	134	135	130	134	135
p1.2.j	155	155	155	155	155	155	155
p1.2.k	175	175	175	175	175	175	175
p1.2.l	195	195	195	195	195	195	195
p1.2.m	215	215	215	215	215	215	215
p1.2.n	235	235	235	235	235	235	235
p1.2.o	240	240	240	240	240	240	240
p1.2.p	250	250	250	250	250	250	250
p1.2.q	265	265	265	265	265	265	265
p1.2.r	280	280	280	280	280	280	280
p1.3.a	0	0	0	0	0	0	0
p1.3.b	0	0	0	0	0	0	0
p1.3.c	15	15	15	15	15	15	15
p1.3.d	15	15	15	15	15	15	15
p1.3.e	30	30	30	30	30	30	30
p1.3.f	40	40	40	40	40	40	40
p1.3.g	50	50	50	50	50	50	50
p1.3.h	70	70	70	70	70	70	70
p1.3.i	105	105	105	105	105	105	105
p1.3.j	115	115	115	115	115	115	115
p1.3.k	135	135	135	135	135	135	135
p1.3.l	155	155	155	155	155	155	155
p1.3.m	175	175	175	175	175	175	175
p1.3.n	190	190	190	190	190	190	190
p1.3.o	205	205	205	205	205	205	205
p1.3.p	220	220	220	220	220	220	220
p1.3.q	230	230	230	230	230	230	230
p1.3.r	250	250	250	250	250	250	250
p1.4.a	0	0	0	0	0	0	0
p1.4.b	0	0	0	0	0	0	0
p1.4.c	0	0	0	0	0	0	0
p1.4.d	15	15	15	15	15	15	15
p1.4.e	15	15	15	15	15	15	15
p1.4.f	25	25	25	25	25	25	25
p1.4.g	35	35	35	35	35	35	35
p1.4.h	45	45	45	45	45	45	45

p1.4.i	60	60	60	60	60	60	60
p1.4.j	75	75	75	75	75	75	75
p1.4.k	100	100	100	100	100	100	100
p1.4.l	120	120	120	120	120	120	120
p1.4.m	130	130	130	130	130	130	130
p1.4.n	160	160	160	160	160	160	155
p1.4.o	165	165	165	165	165	165	165
p1.4.p	175	175	175	175	175	175	175
p1.4.q	190	190	190	190	190	190	190
p1.4.r	210	210	210	210	210	210	210

Tabela 99 - Resultados obtidos no conjunto 2 de instâncias de teste do TOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
p2.2.a	90	90	90	90	90	90	90
p2.2.b	120	120	120	120	120	120	120
p2.2.c	140	140	140	140	140	140	140
p2.2.d	160	160	160	160	160	160	160
p2.2.e	190	190	190	190	190	190	190
p2.2.f	200	200	200	200	200	200	200
p2.2.g	200	200	200	200	200	200	200
p2.2.h	230	230	230	230	230	230	230
p2.2.i	230	230	230	230	230	230	230
p2.2.j	260	260	260	260	260	260	260
p2.2.k	275	275	275	275	275	275	275
p2.3.a	70	70	70	70	70	70	70
p2.3.b	70	70	70	70	70	70	70
p2.3.c	105	105	105	105	105	105	105
p2.3.d	105	105	105	105	105	105	105
p2.3.e	120	120	120	120	120	120	120
p2.3.f	120	120	120	120	120	120	120
p2.3.g	145	145	145	145	145	145	145
p2.3.h	165	165	165	165	165	165	165
p2.3.i	200	200	200	200	200	200	200
p2.3.j	200	200	200	200	200	200	200
p2.3.k	200	200	200	200	200	200	200
p2.4.a	10	10	10	10	10	10	10
p2.4.b	70	70	70	70	70	70	70
p2.4.c	70	70	70	70	70	70	70
p2.4.d	70	70	70	70	70	70	70
p2.4.e	70	70	70	70	70	70	70
p2.4.f	105	105	105	105	105	105	105
p2.4.g	105	105	105	105	105	105	105
p2.4.h	120	120	120	120	120	120	120
p2.4.i	120	120	120	120	120	120	120
p2.4.j	120	120	120	120	120	120	120
p2.4.k	180	180	180	180	180	180	180

Tabela 100 - Resultados obtidos no conjunto 3 de instâncias de teste do TOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
p3.2.a	90	90	90	90	90	90	90

p3.2.b	150	150	150	150	150	150	150
p3.2.c	180	180	180	180	180	180	180
p3.2.d	220	220	220	220	220	220	220
p3.2.e	260	260	260	260	260	260	260
p3.2.f	300	300	300	300	300	300	300
p3.2.g	360	360	360	360	360	360	360
p3.2.h	410	390	404	410	410	410	410
p3.2.i	460	460	460	460	460	460	460
p3.2.j	510	510	510	510	510	510	510
p3.2.k	550	550	550	550	550	550	550
p3.2.l	590	590	590	590	590	590	590
p3.2.m	620	620	620	620	620	620	620
p3.2.n	660	660	660	660	660	660	660
p3.2.o	690	690	690	690	690	690	690
p3.2.p	720	720	720	720	720	720	720
p3.2.q	760	750	758	760	750	756	760
p3.2.r	790	790	790	790	790	790	790
p3.2.s	800	800	800	800	800	800	800
p3.2.t	800	800	800	800	800	800	800
p3.3.a	30	30	30	30	30	30	30
p3.3.b	90	90	90	90	90	90	90
p3.3.c	120	120	120	120	120	120	120
p3.3.d	170	170	170	170	170	170	170
p3.3.e	200	200	200	200	200	200	200
p3.3.f	230	230	230	230	230	230	230
p3.3.g	270	270	270	270	270	270	270
p3.3.h	300	300	300	300	300	300	300
p3.3.i	330	330	330	330	330	330	330
p3.3.j	380	380	380	380	380	380	380
p3.3.k	440	440	440	440	440	440	440
p3.3.l	480	480	480	480	480	480	480
p3.3.m	520	520	520	520	520	520	520
p3.3.n	570	560	568	570	560	568	570
p3.3.o	590	580	588	590	590	590	590
p3.3.p	640	640	640	640	640	640	640
p3.3.q	680	680	680	680	680	680	680
p3.3.r	710	710	710	710	710	710	710
p3.3.s	720	720	720	720	720	720	720
p3.3.t	760	760	760	760	760	760	760
p3.4.a	20	20	20	20	20	20	20
p3.4.b	30	30	30	30	30	30	30
p3.4.c	90	90	90	90	90	90	90
p3.4.d	100	100	100	100	100	100	100
p3.4.e	140	140	140	140	140	140	140
p3.4.f	190	190	190	190	190	190	190
p3.4.g	220	220	220	220	220	220	220
p3.4.h	240	240	240	240	240	240	240
p3.4.i	270	270	270	270	270	270	270
p3.4.j	310	310	310	310	310	310	310
p3.4.k	350	350	350	350	350	350	350
p3.4.l	380	380	380	380	380	380	380
p3.4.m	390	390	390	390	390	390	390
p3.4.n	440	440	440	440	440	440	440
p3.4.o	500	490	496	500	500	500	500
p3.4.p	560	560	560	560	560	560	560

p3.4.q	560	560	560	560	560	560	560
p3.4.r	600	600	600	600	600	600	600
p3.4.s	670	670	670	670	670	670	670
p3.4.t	670	670	670	670	670	670	670

Tabela 101 - Resultados obtidos no conjunto 4 de instâncias de teste do TOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
p4.2.a	206	206	206	206	206	206	206
p4.2.b	341	341	341	341	341	341	341
p4.2.c	452	448	451.2	452	452	452	452
p4.2.d	531	520	526.8	531	528	529.8	531
p4.2.e	618	599	605.2	618	602	612.6	618
p4.2.f	687	681	685.2	687	674	682	687
p4.2.g	750	745	746	753	745	749.4	757
p4.2.h	835	795	809.2	830	808	815.4	835
p4.2.i	918	873	904	918	895	902.6	918
p4.2.j	965	957	960.6	962	959	960.2	965
p4.2.k	1019	973	1005.2	1016	975	995.8	1022
p4.2.l	1070	1012	1034	1053	1022	1037.4	1074
p4.2.m	1122	1056	1089.2	1096	1088	1092	1132
p4.2.n	1166	1113	1144.4	1155	1141	1146.6	1174
p4.2.o	1208	1200	1205.8	1203	1194	1197.6	1218
p4.2.p	1241	1228	1234	1236	1222	1229.4	1242
p4.2.q	1257	1252	1254.2	1261	1252	1258	1268
p4.2.r	1283	1275	1278	1279	1277	1277.6	1292
p4.2.s	1300	1294	1296.6	1300	1292	1296.4	1304
p4.2.t	1306	1306	1306	1306	1306	1306	1306
p4.3.a	0	0	0	0	0	0	0
p4.3.b	38	38	38	38	38	38	38
p4.3.c	193	193	193	193	193	193	193
p4.3.d	335	335	335	335	335	335	335
p4.3.e	468	460	463.6	468	468	468	468
p4.3.f	579	560	570.8	579	579	579	579
p4.3.g	653	639	646.6	653	646	651	653
p4.3.h	729	714	721.6	726	717	720	729
p4.3.i	809	799	805.6	809	806	807.8	809
p4.3.j	861	851	855.2	857	848	853	861
p4.3.k	910	901	905.8	910	895	901.6	919
p4.3.l	979	965	974.6	963	945	957.6	979
p4.3.m	1063	1017	1050.6	1041	1018	1033	1063
p4.3.n	1114	1092	1107.6	1107	1092	1101	1121
p4.3.o	1149	1130	1139.2	1152	1131	1139.8	1172
p4.3.p	1205	1174	1194	1193	1173	1184	1222
p4.3.q	1239	1234	1237	1244	1220	1232.2	1253
p4.3.r	1269	1258	1261.8	1266	1260	1263	1273
p4.3.s	1292	1271	1281.6	1290	1282	1285	1295
p4.3.t	1304	1300	1301.6	1304	1294	1300.8	1305
p4.4.a	0	0	0	0	0	0	0
p4.4.b	0	0	0	0	0	0	0
p4.4.c	0	0	0	0	0	0	0
p4.4.d	38	38	38	38	38	38	38
p4.4.e	183	183	183	183	183	183	183

p4.4.f	324	324	324	324	324	324	324
p4.4.g	461	461	461	461	461	461	461
p4.4.h	571	556	560.2	571	556	566.2	571
p4.4.i	657	657	657	657	651	655.8	657
p4.4.j	732	726	728.4	732	722	728.8	732
p4.4.k	821	820	820.6	821	818	819.4	821
p4.4.l	879	876	877.4	878	876	876.8	880
p4.4.m	915	909	911.8	918	911	913.6	919
p4.4.n	965	959	962.6	965	955	959	977
p4.4.o	1024	995	1012	1035	1008	1018.8	1061
p4.4.p	1124	1066	1102.6	1112	1092	1104.4	1124
p4.4.q	1158	1152	1154.4	1148	1138	1143	1161
p4.4.r	1191	1174	1182.2	1187	1167	1176.4	1216
p4.4.s	1252	1210	1227.6	1248	1226	1238.2	1260
p4.4.t	1279	1256	1266.2	1277	1267	1272.2	1285

Tabela 102 - Resultados obtidos no conjunto 5 de instâncias de teste do TOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
p5.2.a	0	0	0	0	0	0	0
p5.2.b	20	20	20	20	20	20	20
p5.2.c	50	50	50	50	50	50	50
p5.2.d	80	80	80	80	80	80	80
p5.2.e	180	180	180	180	180	180	180
p5.2.f	240	240	240	240	240	240	240
p5.2.g	320	320	320	320	320	320	320
p5.2.h	410	410	410	410	410	410	410
p5.2.i	480	480	480	480	480	480	480
p5.2.j	580	580	580	580	580	580	580
p5.2.k	670	670	670	670	670	670	670
p5.2.l	800	800	800	800	800	800	800
p5.2.m	860	850	858	860	860	860	860
p5.2.n	925	920	923	925	925	925	925
p5.2.o	1020	1010	1018	1020	1020	1020	1020
p5.2.p	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150
p5.2.q	1195	1190	1194	1195	1195	1195	1195
p5.2.r	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260
p5.2.s	1340	1325	1332	1340	1325	1335	1340
p5.2.t	1380	1380	1380	1400	1380	1388	1400
p5.2.u	1460	1460	1460	1460	1450	1458	1460
p5.2.v	1505	1505	1505	1505	1500	1504	1505
p5.2.w	1565	1555	1560	1565	1555	1560	1565
p5.2.x	1610	1600	1606	1610	1600	1608	1610
p5.2.y	1645	1645	1645	1645	1645	1645	1645
p5.2.z	1680	1680	1680	1680	1680	1680	1680
p5.3.a	0	0	0	0	0	0	0
p5.3.b	15	15	15	15	15	15	15
p5.3.c	20	20	20	20	20	20	20
p5.3.d	60	60	60	60	60	60	60
p5.3.e	95	95	95	95	95	95	95
p5.3.f	110	110	110	110	110	110	110
p5.3.g	185	185	185	185	185	185	185
p5.3.h	260	260	260	260	260	260	260

p5.3.i	335	335	335	335	335	335	335
p5.3.j	470	470	470	470	470	470	470
p5.3.k	495	495	495	495	495	495	495
p5.3.l	595	595	595	595	595	595	595
p5.3.m	650	650	650	650	650	650	650
p5.3.n	755	755	755	755	755	755	755
p5.3.o	870	870	870	870	870	870	870
p5.3.p	990	990	990	990	990	990	990
p5.3.q	1070	1065	1069	1070	1070	1070	1070
p5.3.r	1125	1120	1124	1125	1125	1125	1125
p5.3.s	1190	1185	1189	1190	1190	1190	1190
p5.3.t	1260	1255	1259	1260	1250	1257	1260
p5.3.u	1345	1345	1345	1345	1345	1345	1345
p5.3.v	1425	1415	1421	1420	1410	1417	1425
p5.3.w	1480	1465	1469	1485	1465	1471	1485
p5.3.x	1550	1545	1547	1550	1540	1543	1555
p5.3.y	1590	1590	1590	1590	1590	1590	1595
p5.3.z	1635	1635	1635	1635	1635	1635	1635
p5.4.a	0	0	0	0	0	0	0
p5.4.b	0	0	0	0	0	0	0
p5.4.c	20	20	20	20	20	20	20
p5.4.d	20	20	20	20	20	20	20
p5.4.e	20	20	20	20	20	20	20
p5.4.f	80	80	80	80	80	80	80
p5.4.g	140	140	140	140	140	140	140
p5.4.h	140	140	140	140	140	140	140
p5.4.i	240	240	240	240	240	240	240
p5.4.j	340	340	340	340	340	340	340
p5.4.k	340	340	340	340	340	340	340
p5.4.l	430	430	430	430	430	430	430
p5.4.m	555	555	555	555	555	555	555
p5.4.n	620	620	620	620	620	620	620
p5.4.o	690	685	689	690	690	690	690
p5.4.p	765	765	765	765	765	765	765
p5.4.q	860	845	857	860	860	860	860
p5.4.r	960	910	920	960	950	958	960
p5.4.s	1030	1025	1026	1030	1030	1030	1030
p5.4.t	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1160
p5.4.u	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
p5.4.v	1320	1320	1320	1320	1320	1320	1320
p5.4.w	1380	1380	1380	1390	1380	1384	1390
p5.4.x	1450	1440	1442	1450	1440	1445	1450
p5.4.y	1520	1520	1520	1520	1510	1518	1520
p5.4.z	1585	1570	1576	1620	1580	1606	1620

Tabela 103 - Resultados obtidos no conjunto 6 de instâncias de teste do TOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
p6.2.a	0	0	0	0	0	0	0
p6.2.b	0	0	0	0	0	0	0
p6.2.c	0	0	0	0	0	0	0
p6.2.d	192	192	192	192	192	192	192
p6.2.e	384	372	381.6	384	384	384	360

p6.2.f	588	588	588	588	588	588	588
p6.2.g	660	660	660	660	660	660	660
p6.2.h	780	780	780	780	780	780	780
p6.2.i	888	888	888	888	888	888	888
p6.2.j	972	972	972	972	972	972	948
p6.2.k	1032	1032	1032	1032	1032	1032	1032
p6.2.l	1116	1110	1114.8	1116	1116	1116	1116
p6.2.m	1188	1188	1188	1188	1188	1188	1188
p6.2.n	1260	1260	1260	1260	1260	1260	1260
p6.3.a	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.b	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.c	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.d	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.e	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.f	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.g	282	282	282	282	282	282	282
p6.3.h	462	462	462	462	462	462	444
p6.3.i	642	642	642	642	642	642	642
p6.3.j	828	828	828	828	828	828	828
p6.3.k	894	894	894	894	888	892.8	894
p6.3.l	1002	990	992.4	1002	1002	1002	1002
p6.3.m	1080	1074	1078.8	1080	1080	1080	1080
p6.3.n	1170	1170	1170	1170	1170	1170	1170
p6.4.a	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.b	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.c	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.d	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.e	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.f	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.g	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.h	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.i	0	0	0	0	0	0	0
p6.4.j	366	366	366	366	366	366	366
p6.4.k	528	528	528	528	528	528	528
p6.4.l	708	696	705.6	708	708	708	696
p6.4.m	912	912	912	912	912	912	912
p6.4.n	1068	1068	1068	1068	1068	1068	1068

Tabela 104 - Resultados obtidos no conjunto 7 de instâncias de teste do TOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
p7.2.a	30	30	30	30	30	30	30
p7.2.b	64	64	64	64	64	64	64
p7.2.c	101	101	101	101	101	101	101
p7.2.d	190	190	190	190	190	190	190
p7.2.e	290	290	290	290	290	290	290
p7.2.f	387	384	386.4	387	384	386.4	387
p7.2.g	459	459	459	459	459	459	459
p7.2.h	521	521	521	521	521	521	521
p7.2.i	579	558	569	580	578	579	580
p7.2.j	646	631	635.2	646	635	642.4	646
p7.2.k	704	691	699.6	705	700	703.2	705
p7.2.l	767	751	759.8	767	758	763.6	767

p7.2.m	827	782	811	824	817	820.6	827
p7.2.n	888	869	881.4	888	875	881	888
p7.2.o	945	941	942.6	941	928	934.4	945
p7.2.p	1002	999	1000.4	987	974	981.2	1002
p7.2.q	1041	1012	1033.6	1036	1028	1031.4	1044
p7.2.r	1094	1085	1090.4	1081	1064	1074.2	1094
p7.2.s	1135	1114	1122.8	1126	1120	1124.2	1136
p7.2.t	1176	1155	1166.4	1171	1152	1162.2	1179
p7.3.a	0	0	0	0	0	0	0
p7.3.b	46	46	46	46	46	46	46
p7.3.c	79	79	79	79	79	79	79
p7.3.d	117	117	117	117	117	117	117
p7.3.e	175	175	175	175	175	175	175
p7.3.f	247	247	247	247	247	247	247
p7.3.g	344	344	344	344	344	344	344
p7.3.h	425	422	424.4	425	425	425	425
p7.3.i	487	482	484.8	487	485	486.2	487
p7.3.j	564	536	558.4	564	558	562.8	564
p7.3.k	630	614	626.8	633	630	631	633
p7.3.l	682	655	675.8	684	681	682.2	684
p7.3.m	746	734	742.8	762	740	752.6	762
p7.3.n	820	794	806	820	814	817.6	820
p7.3.o	874	858	866.8	874	871	873.4	874
p7.3.p	927	903	919.2	925	921	923.2	929
p7.3.q	987	967	972	977	967	971	987
p7.3.r	1026	1014	1018.4	1019	998	1010	1026
p7.3.s	1071	1055	1060.6	1064	1052	1058.6	1081
p7.3.t	1117	1111	1115	1113	1085	1100.8	1120
p7.4.a	0	0	0	0	0	0	0
p7.4.b	30	30	30	30	30	30	30
p7.4.c	46	46	46	46	46	46	46
p7.4.d	79	79	79	79	79	79	79
p7.4.e	123	123	123	123	123	123	123
p7.4.f	164	164	164	164	164	164	164
p7.4.g	217	217	217	217	217	217	217
p7.4.h	285	285	285	285	285	285	285
p7.4.i	366	366	366	366	366	366	366
p7.4.j	462	462	462	462	462	462	462
p7.4.k	520	516	518.4	520	518	519.6	520
p7.4.l	590	577	585	590	586	587.6	590
p7.4.m	646	640	642.4	646	639	643.2	646
p7.4.n	730	699	721	730	726	729.2	730
p7.4.o	784	757	773	784	768	779.4	781
p7.4.p	842	814	830.8	846	836	842.8	846
p7.4.q	909	877	895.4	910	895	905	909
p7.4.r	969	946	960.8	966	945	960.2	970
p7.4.s	1022	1006	1017.2	1021	1010	1015.2	1022
p7.4.t	1077	1039	1066.2	1077	1052	1064.8	1077

Anexos II

Tabela 105 - Resultados obtidos para o conjunto 1 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
pr01	502	490	498.8	502	498	501.2	502
pr02	711	684	697.8	690	676	684.6	715
pr03	727	707	719.6	713	663	687.8	742
pr04	890	859	872.6	849	799	821.4	926
pr05	1065	1033	1048.6	946	878	911.2	1101
pr06	1005	983	994.8	917	890	905.4	1076
pr07	566	552	560.2	566	548	558.6	566
pr08	805	773	790.8	790	761	773.6	834
pr09	885	798	857	827	770	792.4	909
pr10	1044	1032	1039.4	975	929	947.4	1129

Tabela 106 - Resultados obtidos para o conjunto 1 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
pr01	611	602	608.2	619	607	613.6	622
pr02	915	889	905	895	867	882.4	943
pr03	993	974	984.2	918	896	905.2	1010
pr04	1263	1210	1232.8	1106	1032	1067.4	1294
pr05	1442	1397	1413	1170	1107	1142.4	1482
pr06	1398	1328	1363	1179	1112	1142.2	1514
pr07	732	718	726.8	722	702	712.8	744
pr08	1105	1075	1094.4	1046	987	1011.2	1139
pr09	1199	1147	1179.4	1041	985	1018	1275
pr10	1511	1448	1479.6	1223	1148	1180.4	1573

Tabela 107 - Resultados obtidos para o conjunto 1 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
pr01	657	657	657	657	657	657	657
pr02	1049	1024	1039.8	1007	974	993.8	1079
pr03	1168	1151	1161.2	1095	1037	1070.8	1232
pr04	1492	1455	1478.6	1280	1244	1265.2	1585
pr05	1710	1674	1687.4	1432	1358	1394.2	1838
pr06	1785	1716	1747.2	1402	1343	1376.6	1860
pr07	857	827	841.4	845	828	835.8	876
pr08	1327	1288	1311.4	1192	1163	1175.4	1382
pr09	1547	1484	1520.2	1331	1222	1256.2	1619
pr10	1816	1781	1800.6	1439	1385	1414.2	1943

Tabela 108 - Resultados obtidos para o conjunto 2 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
pr11	554	537	545.6	552	541	546.6	566
pr12	751	732	742.4	738	712	726.2	774

pr13	833	800	820	774	726	756.2	843
pr14	973	947	954.6	865	851	859.8	1017
pr15	1199	1132	1177.2	1057	1026	1038.4	1220
pr16	1149	1115	1130.2	1000	942	971.8	1231
pr17	641	638	639.2	643	626	632.8	652
pr18	888	871	881.8	867	828	846.2	953
pr19	1002	960	976.4	889	861	877.4	1034
pr20	1163	1123	1143.2	1029	949	976.4	1237

Tabela 109 - Resultados obtidos para o conjunto 2 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
pr11	649	645	647.4	649	645	648.2	654
pr12	972	948	964.8	963	918	941	1002
pr13	1114	1090	1102	1002	930	975	1145
pr14	1306	1259	1284	1110	1061	1078.8	1372
pr15	1612	1564	1587.6	1375	1303	1335.2	1654
pr16	1551	1508	1530.4	1303	1255	1272.4	1668
pr17	830	799	815	813	797	805.2	841
pr18	1199	1188	1195	1106	1059	1091.4	1281
pr19	1349	1314	1335.4	1168	1088	1126.8	1417
pr20	1615	1569	1596.75	1270	1235	1254.2	1684

Tabela 110 - Resultados obtidos para o conjunto 2 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
pr11	657	657	657	657	657	657	657
pr12	1092	1074	1080.2	1062	1050	1056.4	1132
pr13	1336	1288	1307.8	1202	1149	1174	1386
pr14	1565	1508	1526.4	1375	1315	1340.2	1670
pr15	1907	1887	1894.6	1621	1567	1593.4	2065
pr16	1886	1852	1874	1557	1498	1521.6	2065
pr17	915	896	908	900	886	895.2	934
pr18	1418	1385	1404.6	1323	1261	1297	1539
pr19	1628	1615	1620.4	1392	1339	1361.8	1750
pr20	1974	1130	1778.8	1559	1497	1530.8	2062

Tabela 111 - Resultados obtidos para o conjunto 3 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
c101	590	580	588	590	590	590	590
c102	650	650	650	660	650	654	660
c103	720	710	712	720	710	714	720
c104	760	750	756	760	740	752	760
c105	640	640	640	640	640	640	640
c106	620	600	616	620	620	620	620
c107	670	660	668	670	670	670	670
c108	680	680	680	680	680	680	680
c109	720	710	712	720	720	720	720
r101	349	343	347.8	349	349	349	349

r102	501	487	495.2	507	496	502.2	508
r103	517	499	510.8	520	517	518.6	522
r104	550	544	547.6	548	539	544	552
r105	447	422	438	447	447	447	453
r106	520	502	511	523	519	522.2	529
r107	538	515	528.2	533	533	533	538
r108	551	540	546.2	558	545	551.8	560
r109	504	474	491.4	506	499	504.4	506
r110	521	479	498.8	525	501	516.6	525
r111	534	522	529.4	542	525	534.6	544
r112	531	528	529.4	542	526	534.2	544
rc101	427	414	418.6	427	427	427	427
rc102	505	497	503	505	504	504.4	505
rc103	523	499	515.6	523	514	520.8	524
rc104	569	540	557.6	569	558	564.6	575
rc105	478	460	472.8	480	478	479.6	480
rc106	482	463	474.2	483	472	480.4	483
rc107	520	501	511.6	529	516	521.8	534
rc108	545	540	542.2	545	540	542.8	556

Tabela 112 - Resultados obtidos para o conjunto 3 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
c101	810	800	806	810	810	810	810
c102	920	900	910	920	920	920	920
c103	980	950	964	970	960	964	990
c104	1010	980	992	1010	980	998	1030
c105	870	840	854	860	850	856	870
c106	870	850	856	870	850	866	870
c107	910	880	894	910	890	904	910
c108	910	900	908	910	900	908	920
c109	960	930	948	960	950	952	970
r101	481	476	480	481	481	481	484
r102	691	682	687.8	691	668	680.2	694
r103	736	714	726.6	727	695	717.6	747
r104	771	755	763.4	770	743	759.8	778
r105	616	606	610	619	612	614.4	620
r106	715	692	703.4	708	700	704	729
r107	753	728	744	750	733	741.4	760
r108	796	769	782.8	797	765	779.4	797
r109	702	666	689.4	708	696	701.4	710
r110	732	681	705.2	734	696	706.6	737
r111	771	749	759	752	725	738.6	774
r112	765	737	754.6	760	746	754	776
rc101	621	600	616.2	621	621	621	621
rc102	714	670	694.8	714	710	711.4	714
rc103	749	686	728	747	728	738.6	764
rc104	832	816	824	828	805	820	835
rc105	682	671	679.2	682	680	681.6	682
rc106	706	682	701	706	698	704.2	706
rc107	768	744	757.8	762	755	758.6	773
rc108	785	775	782.6	785	785	785	795

Tabela 113 - Resultados obtidos para o conjunto 3 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
c101	1020	1010	1014	1020	1010	1018	1020
c102	1150	1120	1134	1150	1130	1138	1150
c103	1180	1160	1172	1190	1160	1174	1210
c104	1210	1200	1206	1220	1200	1210	1260
c105	1060	1050	1056	1060	1040	1048	1070
c106	1070	1040	1054	1060	1050	1052	1080
c107	1100	1080	1094	1100	1080	1090	1120
c108	1100	1090	1098	1100	1090	1098	1130
c109	1150	1140	1146	1160	1140	1148	1190
r101	608	602	606.8	608	602	606.8	611
r102	834	808	821	820	807	813.2	843
r103	911	893	899.6	894	874	885	928
r104	966	950	958.4	945	931	939.8	974
r105	768	745	761.8	761	745	754.8	778
r106	894	869	880.6	882	861	866	906
r107	940	924	931.6	912	894	906	950
r108	982	958	971	970	956	961.4	995
r109	861	850	854.8	864	847	856.4	885
r110	894	881	889.4	888	854	868.2	915
r111	941	932	936.8	920	904	911.6	952
r112	961	952	956.2	958	932	944.2	972
rc101	808	801	805.4	808	801	805.4	811
rc102	899	882	889	889	869	881.8	908
rc103	946	930	941	941	934	938.2	975
rc104	1054	1030	1040.6	1037	1013	1027.4	1064
rc105	875	849	864.4	862	852	857.2	875
rc106	902	863	880	909	870	884.8	909
rc107	973	966	971.2	976	951	965	987
rc108	1018	998	1010	1016	992	1003.2	1025

Tabela 114 - Resultados obtidos para o conjunto 4 de instâncias de teste TOPTW com 2 veículos (m=2).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	$P_{m\acute{e}d}$	
c201	1450	1430	1438	1450	1440	1446	1460
c202	1440	1440	1438	1460	1420	1440	1470
c203	1440	1430	1434	1450	1430	1438	1480
c204	1450	1440	1444	1450	1440	1446	1490
c205	1450	1430	1444	1440	1420	1434	1470
c206	1460	1440	1448	1450	1430	1440	1480
c207	1470	1440	1454	1450	1440	1446	1490
c208	1450	1440	1446	1450	1440	1442	1490
r201	1224	1187	1211.6	1175	1162	1167.4	1254
r202	1321	1301	1308.2	1280	1238	1264	1347
r203	1377	1355	1362.8	1355	1325	1336.6	1416
r204	1439	1437	1437	1428	1418	1423	1458
r205	1337	1299	1309.6	1266	1227	1246.8	1385
r206	1400	1382	1388.4	1375	1347	1360	1444
r207	1428	1421	1422.2	1410	1396	1403.8	1458
r208	1458	1454	1456.8	1456	1451	1453.6	1458

r209	1363	1316	1337.2	1270	1257	1264.4	1414
r210	1375	1341	1357.8	1341	1290	1313.4	1423
r211	1434	1406	1420.2	1395	1376	1382.6	1458
rc201	1341	1322	1332.4	1295	1247	1270.2	1385
rc202	1463	1373	1420.4	1367	1339	1352.2	1509
rc203	1481	1454	1467.4	1438	1413	1427	1632
rc204	1654	1649	1651.6	1644	1609	1627.6	1716
rc205	1394	1335	1361.6	1326	1249	1276	1458
rc206	1432	1401	1418.8	1342	1322	1332.6	1552
rc207	1482	1455	1469.8	1420	1367	1399.6	1587
rc208	1617	1577	1588	1567	1511	1538	1691

Tabela 115 - Resultados obtidos para o conjunto 4 de instâncias de teste TOPTW com 3 veículos (m=3).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
c201	1790	1750	1766	1760	1730	1752	1810
c202	1770	1760	1768	1740	1730	1738	1810
c203	1760	1730	1748	1740	1720	1730	1810
c204	1780	1770	1776	1770	1770	1770	1810
c205	1770	1750	1756	1750	1730	1736	1810
c206	1750	1730	1740	1730	1710	1720	1810
c207	1770	1750	1762	1740	1720	1730	1810
c208	1760	1740	1754	1750	1730	1738	1810
r201	1425	1412	1417.2	1381	1372	1375.4	1441
r202	1458	1452	1454.4	1455	1439	1445	1458
r203	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r204	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r205	1458	1458	1458	1443	1427	1435.6	1458
r206	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r207	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r208	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r209	1458	1458	1458	1450	1437	1445	1458
r210	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r211	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
rc201	1652	1616	1634.8	1579	1538	1553	1698
rc202	1696	1652	1678.4	1656	1628	1641.4	1724
rc203	1724	1714	1720.4	1724	1695	1712.2	1724
rc204	1724	1724	1724	1724	1724	1724	1724
rc205	1660	1622	1641.4	1643	1570	1594.6	1719
rc206	1711	1674	1698.6	1643	1631	1638.6	1724
rc207	1724	1724	1724	1670	1666	1667.6	1724
rc208	1724	1724	1724	1724	1724	1724	1724

Tabela 116 - Resultados obtidos para o conjunto 4 de instâncias de teste TOPTW com 4 veículos (m=4).

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
c201	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810
c202	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810
c203	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810
c204	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810
c205	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810
c206	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810

c207	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810
c208	1810	1810	1810	1810	1810	1810	1810
r201	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r202	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r203	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r204	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r205	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r206	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r207	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r208	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r209	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r210	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
r211	1458	1458	1458	1458	1458	1458	1458
rc201	1709	1697	1701.2	1709	1697	1701.2	1724
rc202	1724	1724	1724	1724	1724	1724	1724
rc203	1724	1724	1724	1724	1724	1724	1724
rc204	1724	1724	1724	1724	1724	1724	1724
rc205	1724	1706	1715	1724	1706	1715	1724
rc206	1724	1724	1724	1724	1724	1724	1724
rc207	1724	1724	1724	1724	1724	1724	1724
rc208	1724	1724	1556.6	1724	1724	1724	1724

Anexos III

Tabela 117 – Resultados obtidos nas instâncias de teste do CTOP.

Instância	GATOP-3			cGA-TOP			MRL
	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	$P_{máx}$	$P_{mín}$	$P_{méd}$	
p03-2-50-50	133	133	133	133	133	133	133
p03-3-50-50	198	198	198	198	197	197.8	198
p03-4-50-50	260	260	260	260	260	260	260
p03-2-75-75	208	205	207.4	208	208	208	208
p03-3-75-75	307	305	306.6	307	307	307	307
p03-4-75-75	402	399	400.8	402	400	401	403
p03-2-100-100	277	274	275.4	277	277	277	277
p03-3-100-100	407	403	406	407	407	407	408
p03-4-100-100	531	528	530.2	532	531	531.8	532
p03-2-200-200	536	536	536	536	536	536	536
p03-3-200-200	762	762	762	762	762	762	762
p03-4-200-200	950	950	950	950	950	950	950
p06-2-50-50	121	121	121	121	121	121	121
p06-3-50-50	177	177	177	177	177	177	177
p06-4-50-50	222	222	222	222	222	222	222
p06-2-75-75	185	180	184	185	182	184.4	183
p06-3-75-75	269	269	269	269	269	269	269
p06-4-75-75	349	343	347	349	346	347.6	349
p06-2-100-100	252	251	251.4	252	251	251.6	252
p06-3-100-100	369	366	368	369	369	369	369
p06-4-100-100	482	481	481.4	482	481	481.8	482
p06-2-160-200	403	403	403	403	403	403	403
p06-3-160-200	565	565	565	565	565	565	565
p06-4-160-200	683	683	683	683	683	683	683
p07-2-50-50	126	126	126	126	126	126	126
p07-3-50-50	187	187	187	187	187	187	187

p07-4-50-50	240	240	240	240	240	240	240
p07-2-75-75	193	191	192.6	193	193	193	193
p07-3-75-75	284	283	283.8	287	284	285.8	287
p07-4-75-75	378	373	375.4	378	374	375.6	378
p07-2-100-100	266	265	265.8	266	266	266	266
p07-3-100-100	397	394	395	397	393	395.6	397
p07-4-100-100	521	513	516.4	521	518	518.6	521
p07-2-140-160	377	376	376.2	376	376	376	377
p07-3-140-160	548	548	548	548	547	547.4	548
p07-4-140-160	707	707	707	707	707	707	707
p08-2-50-50	133	133	133	133	133	133	133
p08-3-50-50	198	196	197.4	198	198	198	198
p08-4-50-50	260	260	260	260	260	260	260
p08-2-75-75	208	206	207.6	208	208	208	208
p08-3-75-75	307	306	306.8	307	307	307	307
p08-4-75-75	401	400	400.6	403	401	401.8	403
p08-2-100-100	277	276	276.2	277	276	276.4	277
p08-3-100-100	407	406	406.2	408	407	407.2	408
p08-4-100-100	532	527	530.4	532	531	531.6	532
p08-2-200-230	536	536	536	536	536	536	536
p08-3-200-230	762	762	762	762	762	762	762
p08-4-200-230	950	950	950	950	950	950	950
p09-2-50-50	137	134	136.4	137	137	137	137
p09-3-50-50	201	201	201	201	201	201	201
p09-4-50-50	262	259	260.6	262	260	261.4	262
p09-2-75-75	210	206	209	210	209	209.8	210
p09-3-75-75	311	304	308	312	311	311.8	312
p09-4-75-75	407	406	406.8	407	405	406.2	408
p09-2-100-100	279	278	278.8	279	279	279	279
p09-3-100-100	413	409	410.6	415	412	413.2	415
p09-4-100-100	545	539	541.8	542	542	542	546
p09-2-200-200	547	546	546.4	547	547	547	548
p09-3-200-200	797	796	796.8	796	795	795.8	797
p09-4-200-200	1029	1028	1028.6	1029	1027	1028.2	1033
p10-2-50-50	134	134	134	134	134	134	134
p10-3-50-50	200	200	200	200	200	200	200
p10-4-50-50	265	262	263.8	265	265	265	265
p10-2-75-75	208	205	206.8	208	208	208	208
p10-3-75-75	310	305	308.4	311	309	309.6	311
p10-4-75-75	409	407	408	410	409	409.8	411
p10-2-100-100	281	278	279.6	282	281	281.8	282
p10-3-100-100	416	413	415	418	415	416.8	418
p10-4-100-100	551	549	550.4	551	550	550.8	553
p10-2-200-200	555	554	554.6	556	555	555.8	556
p10-3-200-200	816	816	816	816	815	815.8	816
p10-4-200-200	1064	1064	1064	1064	1064	1064	1064
p13-2-50-50	134	133	133.6	134	134	134	134
p13-3-50-50	193	193	193	193	193	193	193
p13-4-50-50	242	239	240.2	243	243	243	243
p13-2-75-75	193	193	193	193	193	193	193
p13-3-75-75	265	265	265	265	265	265	265
p13-4-75-75	323	323	323	323	323	323	323
p13-2-100-100	253	253	253	253	253	253	253
p13-3-100-100	344	343	343.8	344	344	344	344
p13-4-100-100	419	419	419	419	419	419	419

p13-2-200-720	513	513	513	513	513	513	513
p13-3-200-720	727	726	726.8	727	727	727	727
p13-4-200-720	908	908	908	908	908	908	908
p14-2-50-50	124	124	124	124	124	124	124
p14-3-50-50	184	184	184	184	184	184	184
p14-4-50-50	241	241	241	241	241	241	241
p14-2-75-75	190	190	190	190	190	190	190
p14-3-75-5	279	279	279	279	279	279	279
p14-4-75-75	366	364	365	366	366	366	366
p14-2-100-100	271	269	270.4	271	271	271	271
p14-3-100-100	399	397	397.8	399	397	398.6	399
p14-4-100-100	525	519	523.8	525	525	525	525
p14-2-200-1040	534	534	534	534	534	534	534
p14-3-200-1040	770	770	770	770	770	770	770
p14-4-200-1040	975	975	975	975	975	975	975
p15-2-50-50	134	133	133.4	134	134	134	134
p15-3-50-50	200	199	199.2	200	200	200	200
p15-4-50-50	266	266	266	266	266	266	266
p15-2-75-75	210	209	209.6	211	210	210.4	211
p15-3-75-75	315	315	315	315	313	314.6	315
p15-4-75-75	415	412	413.6	415	414	414.6	415
p15-2-100-100	282	282	282	282	282	282	282
p15-3-100-100	417	415	415.8	417	416	416.8	418
p15-4-100-100	548	547	547.8	548	546	547.4	549
p15-2-200-200	550	550	550	550	550	550	550
p15-3-200-200	802	802	802	802	802	802	802
p15-4-200-200	1031	1030	1030.6	1031	1031	1031	1031
p16-2-50-50	137	137	137	137	137	137	137
p16-3-50-50	203	203	203	203	203	203	203
p16-4-50-50	269	269	269	269	269	269	269
p16-2-75-75	212	211	211.8	212	212	212	212
p16-3-75-75	317	317	317	317	317	317	317
p16-4-75-75	420	416	419	420	419	419.8	420
p16-2-100-100	285	284	284.4	285	285	285	285
p16-3-100-100	422	421	421.4	422	422	422	423
p16-4-100-100	556	554	555	556	554	555.2	558
p16-2-200-200	558	558	558	558	558	558	558
p16-3-200-200	822	822	822	822	822	822	822
p16-4-200-200	1073	1073	1073	1073	1073	1073	1073

Anexos IV

Agendamento de recolha de papéis e embalões (multi-produto)

Tabela 118 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na subfase F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Distância (km)	Custo em Combustível (€)					
		VEÍCULOS - ID					
		2	4	5	6	9	10
1	57.24	36.48	34.14	38.14	42.88	25.21	27.48
2	60.87	38.8	36.31	40.56	45.6	26.81	29.22
3	48.16	30.7	28.73	32.09	36.08	21.21	23.12
4	69.31	44.18	41.34	46.18	51.93	30.52	33.28
5	41.18	26.25	24.56	27.44	30.85	18.14	19.77
6	60.48	38.55	36.08	40.3	45.31	26.64	29.04
7	57.01	36.34	34.01	37.99	42.71	25.11	27.37
8	44.42	28.31	26.5	29.6	33.28	19.56	21.33
9	68.84	43.88	41.06	45.87	51.57	30.32	33.05
10	56.28	35.87	33.57	37.5	42.16	24.79	27.02
11	68.06	43.38	40.6	45.35	50.99	29.97	32.68
12	54.91	35	32.75	36.59	41.14	24.18	26.36
13	43.39	27.66	25.88	28.91	32.51	19.11	20.83
14	65.68	41.86	39.18	43.76	49.21	28.93	31.53
15	62.19	39.64	37.1	41.44	46.59	27.39	29.86
16	72.61	46.28	43.31	48.38	54.4	31.98	34.86
17	56.42	35.96	33.65	37.59	42.27	24.85	27.09
18	43.83	27.94	26.14	29.2	32.84	19.3	21.04
19	60.38	38.49	36.02	40.23	45.24	26.59	28.99
20	49.57	31.6	29.57	33.03	37.14	21.83	23.8
21	57.86	36.88	34.51	38.55	43.35	25.48	27.78
22	64.77	41.28	38.64	43.16	48.53	28.52	31.1
23	65.63	41.83	39.15	43.73	49.17	28.9	31.51
TOTAL	1329.09	847.16	792.8	885.59	995.75	585.34	638.11

Tabela 119 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na subfase F2-A para veículos sem compactador.

Rota / Dia de Recolha	Distância (km)			Custo em Combustível (€)			
	VEÍCULOS - ID			VEÍCULOS - ID			
	1	7	3,8	1	3	7	8
1	95.08	102	57.24	22.01	14.42	28.41	30.71
2	58.1	53.89	60.87	13.45	15.33	15.01	32.66
3	52.55	61.62	48.16	12.17	12.13	17.16	25.84

4	101.33	69.06	69.31	23.46	17.46	19.23	37.18
5	84.27	93.91	41.18	19.51	10.37	26.15	22.09
6	105.48	104.34	60.48	24.42	15.23	29.06	32.45
7	101.38	108.57	57.01	23.47	14.36	30.24	30.59
8	49.24	49.9	44.42	11.4	11.19	13.9	23.83
9	97.44	65.38	68.84	22.56	17.34	18.21	36.93
10	84.66	112.65	56.28	19.6	14.18	31.37	30.19
11	94.12	65.55	68.06	21.79	17.14	18.26	36.51
12	47.64	50.39	54.91	11.03	13.83	14.03	29.46
13	86.59	89.15	43.39	20.05	10.93	24.83	23.28
14	66.14	66.62	65.68	15.31	16.54	18.55	35.24
15	108.92	96.7	62.19	25.21	15.67	26.93	33.36
16	90.92	91.71	72.61	21.05	18.29	25.54	38.96
17	95.47	94.71	56.42	22.1	14.21	26.38	30.27
18	86.97	42.23	43.83	20.13	11.04	11.76	23.51
19	54.88	55.62	60.38	12.7	15.21	15.49	32.39
20	89.54	93.39	49.57	20.73	12.49	26.01	26.59
21	107.6	99.52	57.86	24.91	14.57	27.72	31.04
22	64.09	57.89	64.77	14.84	16.32	16.12	34.75
23	109.75	48.68	65.63	25.41	16.53	13.56	35.21
TOTAL	1932	1774	1329	447.31	334.78	493.92	713.04

Agendamento de recolha de papelões (mono-produto)

Tabela 120 – Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m ³)	Distância (km)	Custo em Combustível (€)					
			VEÍCULOS - ID					
			2	4	5	6	9	10
1	4.043	57.24	36.48	34.14	38.14	42.88	25.21	27.48
2	2.573	60.87	38.8	36.31	40.56	45.6	26.81	29.22
3	4.516	48.16	30.7	28.73	32.09	36.08	21.21	23.12
4	3.987	69.31	44.18	41.34	46.18	51.93	30.52	33.28
5	3.681	41.18	26.25	24.56	27.44	30.85	18.14	19.77
6	3.598	60.48	38.55	36.08	40.3	45.31	26.64	29.04
7	3.903	57.01	36.34	34.01	37.99	42.71	25.11	27.37
8	3.025	44.42	28.31	26.5	29.6	33.28	19.56	21.33
9	4.085	68.84	43.88	41.06	45.87	51.57	30.32	33.05
10	6.201	56.28	35.87	33.57	37.5	42.16	24.79	27.02
11	4.517	68.06	43.38	40.6	45.35	50.99	29.97	32.68
12	2.576	54.91	35	32.75	36.59	41.14	24.18	26.36
13	3.584	43.39	27.66	25.88	28.91	32.51	19.11	20.83
14	3.284	65.68	41.86	39.18	43.76	49.21	28.93	31.53
15	4.564	62.19	39.64	37.1	41.44	46.59	27.39	29.86
16	4.320	72.61	46.28	43.31	48.38	54.4	31.98	34.86
17	2.829	56.42	35.96	33.65	37.59	42.27	24.85	27.09

18	4.364	43.83	27.94	26.14	29.2	32.84	19.3	21.04
19	2.807	60.38	38.49	36.02	40.23	45.24	26.59	28.99
20	6.027	49.57	31.6	29.57	33.03	37.14	21.83	23.8
21	3.532	57.86	36.88	34.51	38.55	43.35	25.48	27.78
22	2.988	64.77	41.28	38.64	43.16	48.53	28.52	31.1
23	3.372	65.63	41.83	39.15	43.73	49.17	28.9	31.51
TOTAL								
	88.376	1329.09	847.16	792.8	885.59	995.75	585.34	638.11

Tabela 121 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m ³)		Distância (km)		Custo em Combustível (€)			
	VEÍCULOS - ID		VEÍCULOS - ID		VEÍCULOS - ID			
	1	3, 7, 8	1	3, 7, 8	1	3	7	8
1	4.288	5.775	59.14	57.24	13.69	14.42	15.94	30.71
2	3.024	3.675	54.58	60.87	12.64	15.33	16.95	32.66
3	3.701	6.452	54.7	48.16	12.66	12.13	13.41	25.84
4	3.559	5.696	67.26	69.31	15.57	17.46	19.3	37.18
5	4.200	5.259	45.14	41.18	10.45	10.37	11.47	22.09
6	3.838	5.139	65.38	60.48	15.14	15.23	16.84	32.45
7	4.145	5.576	58.41	57.01	13.52	14.36	15.88	30.59
8	3.258	4.322	54.7	44.42	12.66	11.19	12.37	23.83
9	4.061	5.836	67.55	68.84	15.64	17.34	19.17	36.93
10	4.934	8.858	52.4	56.28	12.13	14.18	15.67	30.19
11	4.566	6.453	56.78	68.06	13.14	17.14	18.95	36.51
12	3.317	3.679	52.82	54.91	12.23	13.83	15.29	29.46
13	3.657	5.120	54.31	43.39	12.57	10.93	12.08	23.28
14	3.506	4.691	66.6	65.68	15.42	16.54	18.29	35.24
15	4.077	6.520	65.12	62.19	15.08	15.67	17.32	33.36
16	4.268	6.172	64.43	72.61	14.92	18.29	20.22	38.96
17	3.83	4.041	56.16	56.42	13	14.21	15.71	30.27
18	2.837	6.235	59.9	43.83	13.87	11.04	12.21	23.51
19	3.3	4.010	56.19	60.38	13.01	15.21	16.82	32.39
20	4.672	8.610	49.21	49.57	11.39	12.49	13.81	26.59
21	4.11	5.046	65.36	57.86	15.13	14.57	16.11	31.04
22	3.38	4.269	62.68	64.77	14.51	16.32	18.04	34.75
23	3.953	4.817	45.3	65.63	10.49	16.53	18.28	35.21
TOTAL								
	88.481	126.251	1334	1329	308.86	334.78	370.13	713.04

Agendamento de recolha de embalões (mono-produto)

Tabela 122 - Detalhe dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m ³)	Distância (km)	Custo em Combustível (€)					
			VEÍCULOS - ID					
			2	4	5	6	9	10
1	2.940	50.67	32.3	30.22	33.76	37.96	22.32	24.33
2	3.082	52.43	33.42	31.27	34.93	39.28	23.09	25.17
3	2.660	52.51	33.47	31.32	34.99	39.34	23.13	25.21
4	3.282	52.5	33.46	31.32	34.98	39.33	23.12	25.21
5	2.628	61.78	39.38	36.85	41.16	46.29	27.21	29.66
6	3.289	60.31	38.44	35.97	40.18	45.18	26.56	28.95
7	2.773	58.26	37.13	34.75	38.82	43.65	25.66	27.97
8	3.352	43.98	28.03	26.23	29.3	32.95	19.37	21.11
9	2.929	62.36	39.75	37.2	41.55	46.72	27.46	29.94
10	3.935	44.64	28.45	26.63	29.74	33.44	19.66	21.43
11	3.357	56.96	36.31	33.98	37.95	42.67	25.09	27.35
12	1.974	55.95	35.66	33.37	37.28	41.92	24.64	26.86
13	3.616	43.28	27.59	25.82	28.84	32.43	19.06	20.78
14	2.636	36.48	23.25	21.76	24.31	27.33	16.07	17.51
15	3.149	66.23	42.22	39.51	44.13	49.62	29.17	31.8
16	4.077	68.55	43.69	40.89	45.67	51.36	30.19	32.91
17	4.158	51.6	32.89	30.78	34.38	38.66	22.72	24.77
18	3.055	50.87	32.42	30.34	33.89	38.11	22.4	24.42
19	2.194	54.18	34.53	32.32	36.1	40.59	23.86	26.01
20	3.369	45.35	28.91	27.05	30.22	33.98	19.97	21.77
21	4.457	63.63	40.56	37.96	42.4	47.67	28.02	30.55
22	2.790	57.66	36.75	34.39	38.42	43.2	25.39	27.68
23	3.252	43.42	27.68	25.9	28.93	32.53	19.12	20.85
TOTAL	72.954	1233.6	786.29	735.83	821.93	924.21	543.28	592.24

Tabela 123 - Resumo dos resultados obtidos para o agendamento na etapa F2-A para veículos com compactador.

Rota / Dia de Recolha	Quantidade (m ³)	Distância (km)	Custo em Combustível (€)			
			VEÍCULOS - ID			
			1	3	7	8
1	4.200	50.67	11.73	12.76	14.11	27.18
2	4.403	52.43	12.14	13.21	14.6	28.13
3	3.800	52.51	12.16	13.23	14.62	28.17
4	4.688	52.5	12.15	13.22	14.62	28.17
5	3.754	61.78	14.3	15.56	17.21	33.14
6	4.698	60.31	13.96	15.19	16.8	32.36
7	3.962	58.26	13.49	14.68	16.23	31.26

8	4.788	43.98	10.18	11.08	12.25	23.6
9	4.184	62.36	14.44	15.71	17.37	33.46
10	5.621	44.64	10.33	11.24	12.43	23.95
11	4.796	56.96	13.19	14.35	15.86	30.56
12	2.820	55.95	12.95	14.09	15.58	30.02
13	5.165	43.28	10.02	10.9	12.05	23.22
14	3.766	36.48	8.45	9.19	10.16	19.57
15	4.499	66.23	15.33	16.68	18.45	35.53
16	5.824	68.55	15.87	17.27	19.09	36.78
17	5.940	51.6	11.95	13	14.37	27.68
18	4.364	50.87	11.78	12.81	14.17	27.29
19	3.134	54.18	12.54	13.65	15.09	29.07
20	4.813	45.35	10.5	11.42	12.63	24.33
21	6.367	63.63	14.73	16.03	17.72	34.14
22	3.986	57.66	13.35	14.52	16.06	30.93
23	4.646	43.42	10.05	10.94	12.09	23.29
TOTAL						
	104.218	1233.6	285.59	310.73	343.56	661.83

Anexos V

Tabela 124 – Lista completa com os 39 fatores testados nos modelos de previsão.

H	-	Número de Habitantes na freguesia
DPOP	-	Densidade Populacional
DPOP2	-	Densidade Populacional – Escala: 1 nível por cada 100 habitantes por km^2
NC_x	-	Número de Contentores do tipo x na freguesia
HC_x	-	Habitantes por Contentor do tipo x
$HC2_x$	-	HC_x com escala de 1 nível por cada 100 habitantes por contentor
CC_x	-	Densidade de Contentores (número de contentores do tipo x por cada km^2)
TIPO	-	Tipo de Contentor
CAP	-	Capacidade do Contentor (em metros cúbicos)
CAP2	-	Capacidade do Contentor – Escala: nível 1 ($2.5m^3$), nível 1 ($3m^3$), nível 1 ($5m^3$)
C_x300	-	Número de Contentores do tipo x num raio de 300 m (metros)
Esc	-	Número de Escolas num raio de 300m em torno do contentor – Níveis: <ol style="list-style-type: none"> 1. Escola Primária (EB1) / Escola Profissional 2. Escola EB 2,3 3. Escola Secundária
Esc2	-	Número de Escolas num raio de 300m em torno do contentor
EdGov	-	Número de Edifícios Governamentais num raio de 300m em torno do contentor
CBRPP	-	Cafés, Bares/Discotecas, Restaurantes, Padarias e Pastelarias num raio de 300m
CBRPP2	-	CBRPP - Escala: Níveis de 1 a 6 corresponde ao número correspondente de estabelecimentos; nível 7 para mais do que 6 estabelecimentos
CRET	-	Estabelecimentos de comércio a retalho num raio de 300m em torno do contentor
CRET2	-	CRET – Escala: Níveis de 1 a 6 corresponde ao número correspondente de estabelecimentos; nível 7 para mais do que 6 estabelecimentos
HPA	-	Hotéis, Pousadas e outras infraestruturas de alojamento num raio de 300m
LTD	-	Número de infraestruturas de Lazer, Turismo e Desporto num raio de 300m
FD	-	Fator Demográfico
FS	-	Fator Social (Esc+EdGov)
FS2	-	Fator Social 2 (Esc2 + EdGov)
FS3	-	Fator Social 3 (Esc2 + EdGov + LTD)
FE	-	Fator Económico (CBRPP + CRET)
FE2	-	Fator Económico 2 (CBRPP2 + CRET2)
FE3	-	Fator Económico 3 (CBRPP + CRET + HPA)
FE4	-	Fator Económico 4 (CBRPP2 + CRET2 + HPA)
FE5	-	FE com escala: 1 nível por cada 5 estabelecimentos
FE6	-	FE2 com escala: 1 nível por cada 5 níveis
FE7	-	FE7 = FE3 com escala: 1 nível por cada 5 estabelecimentos
FE8	-	FE3 com escala: 1 nível por cada 5 níveis de CBRPP + CRET, e soma HPA
FE9	-	FE4 com escala: 1 nível por cada 5 níveis de CBRPP2 + CRET2, e soma HPA
FTL	-	Fator Turismo-Lazer (HPA + LTD)
FSE	-	Fator Sócio-Económico (Esc + EdGov + CBRPP + CRET + HPA + LTD)
FSEB	-	Fator Sócio-Económico B = FSE com escala: 1 nível por cada 5 elementos
FSE2	-	Fator Sócio-Económico 2 (Esc2 + EdGov + CBRPP + CRET + HPA + LTD)
FSE2B	-	Fator Sócio-Económico 2B = FSE2 com escala: 1 nível por cada 5 elementos
FSE3	-	Fator Sócio-Económico 3 (Esc2 + EdGov + CBRPP2 + CRET2 + HPA + LTD)