

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL



Afetação de Cargas no Transporte Rodoviário de Mercadorias

Mestrado em Matemática Aplicada à Economia e à Gestão

David Martins Faria de Bastos

Trabalho de Projeto orientado por:
Professor João Miguel Telhada

Resumo

Para uma empresa cuja operação envolva o transporte de cargas, é fundamental que se recorra a processos de planeamento de rotas com bons desempenhos. A qualidade inerente a estes processos é determinante para que a utilização de recursos, em particular a frota de veículos disponíveis, permita alcançar as metas definidas.

Neste trabalho é realizada uma análise comparativa da aplicação de diferentes métodos heurísticos ao planeamento de rotas. É considerado um cenário em que existe um conjunto de pedidos que deverão ser servidos por uma frota de veículos. Os pedidos são colocados progressivamente ao longo do tempo, provocando a necessidade de se aplicarem alterações a rotas de forma a permitir que esses pedidos possam ficar afetados a alguma das viaturas. Para cada pedido é conhecida uma quantidade, um local de carga, e um local de descarga, e a cada local estão associados intervalos temporais que impõe limites para os instantes em que se pode iniciar a respetiva carga ou descarga. Os cenários considerados foram obtidos através de um gerador de instâncias, concebido para o efeito, e que permite a definição de diferentes parametrizações para as instâncias a gerar.

Os algoritmos implementados podem ser divididos em três conjuntos. Num primeiro conjunto, são consideradas heurísticas de inserção que se pretende que sirvam como enquadramento para decisões humanas, tomadas de uma forma intuitiva. Num segundo conjunto, é usado um Algoritmo Genético, sendo pretendido obter conjuntos de rotas com maior qualidade do que as obtidas com as heurísticas de inserção. Num terceiro conjunto, em que também se recorre ao Algoritmo Genético, é adicionado um método de seleção de rotas que recorre a cenários previsionais obtidos a partir de pedidos conhecidos, com o qual se pretende alcançar benefícios num prazo mais alargado.

Os resultados obtidos apontam para um melhor desempenho por parte do Algoritmo Genético, face às heurísticas de inserção. Verificou-se que o desempenho dos algoritmos em que se introduz a componente previsional é fortemente afetado pela parametrização das instâncias, na medida em que essa parametrização restringe a qualidade das previsões.

São também propostos desenvolvimentos e alterações ao trabalho realizado, que se considera poderem conduzir a melhores desempenhos por parte dos algoritmos considerados, bem como permitir a obtenção de resultados mais conclusivos.

Palavras-chave: Planeamento de Rotas. Transporte Rodoviário de Mercadorias. Problema de Roteamento de Veículos Dinâmico. Algoritmo Genético. Geração de Cenários.

Abstract

For companies where transportation is a significant part of the business process, high performance route planning methods are mandatory. The quality of these methods is crucial in achieving the best use of the available resources, in particular the fleet of vehicles.

This thesis work involves a comparative analysis of different heuristic methods for route planning problems. Several requests are considered, which should be fulfilled by a fleet of vehicles. These requests are progressively known over time, thus requiring the need for route modifications in order to allow those requests to be fulfilled. Each request is characterized by a load, a pickup location, a delivery location, and time-windows which limit the instants when each pickup or delivery may begin. The used scenarios were obtained by an instance generator, which was designed for that purpose, which allows the previous definition of different parametrizations for the generated instances.

Three groups of algorithms were considered. The first group includes three insertion heuristics, which are thought of as a framework for the outcome of human decisions. In the second group a Genetic Algorithm is used, with the purpose of obtaining better results in comparison to the first group. A third group of algorithms, also using the Genetic Algorithm, incorporate a method for route selection based on sets of predicted requests using previously known requests, with the purpose of achieving longer term benefits.

Overall, the results which were achieved using the Genetic Algorithm were better than those obtained using the insertion heuristic. The performance gain of incorporating the scenario generation is highly influenced by the parametrization defined for each instance, which affects the quality of the predicted requests.

Modifications regarding several aspects of the current thesis work are proposed, hoping these might lead to a performance increase for the Genetic Algorithm, and also allowing more relevant results.

Keywords: Route Planning. Road Freight Transport. Dynamic Vehicle Routing Problem. Genetic Algorithm. Scenario Generation.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. João Telhada, pelas inúmeras contribuições positivas para o trabalho que foi desenvolvido.

À BTEN e à Transportes Mariano e, em particular, ao Eng.º José Rui Soares e ao Paulo Silva, respetivamente, pelas oportunidades proporcionadas.

À Prof.^a Ana Paias, ao Prof. Miguel Constantino, e à Prof.^a Teresa Alpuim, que apoiaram o trabalho desenvolvido de diferentes formas.

Por fim, quero agradecer aos meus familiares e amigos que contribuíram para a realização deste relatório.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Índice.....	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Parte I – Enquadramento	1
1. Introdução	3
1.1 Metodologia.....	3
1.2 Estrutura do Relatório.....	4
2. Eficiência nos Transportes	5
2.1 Efeitos do Transporte.....	6
2.1.1 Modos de Transporte em Geral.....	6
2.1.2 Transporte Rodoviário de Mercadorias	9
2.2 Promoção da Eficiência nos Transportes	11
2.2.1 Modos de Transporte em Geral.....	11
2.2.2 Transporte Rodoviário de Mercadorias	13
2.3 Planeamento de Rotas	15
2.3.1 Objetivos do Planeamento de Rotas	15
2.3.2 Condicionantes no Planeamento de Rotas	16
2.3.3 Exemplificação	18
3. Enquadramento Teórico	21
3.1 TSP	22
3.2 VRP	22
3.3 Variantes do VRP	22
3.3.1 CVRP	23
3.3.2 DCVRP	24
3.3.3 VRPTW	24
3.3.4 VRPB	25
3.3.5 VRPPD.....	25
3.3.6 VRPBTW e VRPPDTW.....	26
3.4 Categorização do VRP	26

Parte II – Metodologia	29
4. Definição do Problema	31
4.1 O Meta-Problema	32
4.2 Abordagem à Componente Dinâmica	34
4.3 O Problema	38
5. Formulação	41
6. Instâncias	51
6.1 Gerador de Instâncias.....	51
6.1.1 Horizonte Temporal	52
6.1.2 Dimensão da Região	52
6.1.3 Duração do Processo de Decisão.....	53
6.1.4 Localização da Sede.....	53
6.1.5 Número de veículos	53
6.1.6 Capacidade dos Veículos.....	53
6.1.7 Distribuição dos locais.....	53
6.1.8 Frequência de pedidos.....	55
6.1.9 Antecedência	56
6.1.10 Amplitude das Janelas Temporais	56
6.1.11 Folga	56
6.1.12 Cargas	57
6.1.13 Tempos de Serviço	57
6.2 Instâncias geradas	57
6.2.1 Instâncias 1 a 4.....	58
6.2.2 Instâncias 5 a 10.....	59
7. Algoritmos.....	61
7.1 Aspectos que Distinguem os Algoritmos.....	61
7.1.1 Alterações a rotas previamente definidas.....	61
7.1.2 Abordagem às folgas.....	62
7.1.3 Cenários previsionais	63
7.1.4 Critérios de seleção na cenarização.....	65
7.2 Heurística de Inserção	66
7.3 Algoritmo Genético.....	67
7.3.1 Codificação	68
7.3.2 População inicial	71
7.3.3 Avaliação.....	74
7.3.4 Operações	76

7.4	Caracterização dos Algoritmos	79
Parte III – Resultados		81
8.	Análise de Resultados	83
8.1	Instâncias 1 a 4	84
8.2	Instâncias 5 a 7	87
8.3	Instâncias 8 a 10	90
9.	Conclusões	97
Bibliografia.....		101

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissões GEE nos EUA por setor em 2013	7
Figura 2 - Emissões GEE na UE por setor em 2012.....	8
Figura 3- Evolução das emissões GEE do transporte e outros setores, 1990-2012	8
Figura 4 - Emissões GEE na UE por meio de transporte, 2012.....	10
Figura 5 - Transporte de mercadorias na EU repartido por 5 meios de transporte, 2013 (% de tonelada-quilômetro).....	10
Figura 6 - Mercadorias transportadas por meio de transporte, 2012	11
Figura 7 – Planeamento de rotas sem componente dinâmica	18
Figura 8 – Planeamento de rotas com componente dinâmica	19
Figura 9 - Relação entre problemas básicos da classe VRP	23
Figura 10 - Ocorrência de decisões ao longo do horizonte temporal	32
Figura 11 - Definição prévia dos instantes em que ocorrem decisões	35
Figura 12 – Fixação de período de tempo entre instantes de receção de pedidos e instantes em que ocorrem decisões.....	36
Figura 13 - Ocorrência de decisões após receção de dois pedidos.....	37
Figura 14 - Ocorrência de decisões após cada receção de pedidos.....	37
Figura 15 - Decisões com duração associada	38
Figura 16 - Exemplo de uma instância	45
Figura 17 - Exemplo de uma solução	45
Figura 18 – Exemplo com introdução de armazéns “fictícios”	46
Figura 19 – Distribuição de probabilidades associadas a locais, sem zonas de concentração de probabilidades mais elevadas	54
Figura 20 – Distribuição de probabilidades associadas a locais, com zonas de concentração de probabilidades mais elevadas	54
Figura 21 - Distribuição de probabilidades associadas a locais, com zonas de concentração de probabilidades mais elevadas, com maior disparidade entre as probabilidades.....	55
Figura 22 - Comparação entre número de soluções consideradas em cada critério de inserção	67
Figura 23 – Fluxograma Algoritmo Genético	68
Figura 24 - Correspondência entre veículos e posições nos cromossomas.....	69
Figura 25 – Ilustração de uma codificação alternativa.....	70
Figura 26 - Repartição da população global em subpopulações	71

Figura 27 - Obtenção de indivíduos da população inicial na primeira implementação.....	73
Figura 28 - Cruzamento PMX	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Taxonomia de problemas de roteamento de veículos com base na evolução e na qualidade da informação	27
Tabela 2 - Comparação de soluções	33
Tabela 3 - Parametrização das instâncias 1 e 2.....	59
Tabela 4 - Parametrização das instâncias 3 e 4.....	59
Tabela 5 - Parametrização comum às instâncias 5, 6 e 7	60
Tabela 6 - Resultados obtidos para a Instância 1	84
Tabela 7 - Resultados obtidos para a Instância 2	85
Tabela 8 - Resultados obtidos para a Instância 3	86
Tabela 9 - Resultados obtidos para a Instância 4	87
Tabela 10 - Resultados obtidos para a Instância 5.....	87
Tabela 11 - Resultados obtidos para a Instância 6.....	89
Tabela 12 - Resultados obtidos para a Instância 7.....	89
Tabela 13 - Resultados obtidos para a Instância 8.....	91
Tabela 14 - Soluções ótimas para a Instância 8'	92
Tabela 15 - Resultados obtidos para a Instância 8'	92
Tabela 16 - Resultados obtidos para a Instância 9.....	93
Tabela 17 - Soluções ótimas para a Instância 9'	93
Tabela 18 - Resultados obtidos para a Instância 9'	94
Tabela 19 - Resultados obtidos para a Instância 10.....	94
Tabela 20 - Soluções ótimas para a Instância 10'.....	95
Tabela 21 - Resultados obtidos para a Instância 10'	95

Parte I – Enquadramento

1. Introdução
2. Eficiência nos Transportes
3. Enquadramento Teórico

1. Introdução

O forte recurso aos diversos modos de transporte faz com que a intensificação da utilização de ferramentas capazes de aumentar a eficiência no setor tenha potencial para produzir benefícios significativos a uma escala global.

O presente trabalho aborda o transporte rodoviário de mercadorias, e foca o planejamento de rotas enquanto ferramenta com potencial para permitir o recurso a rotas mais eficientes. O objetivo deste trabalho é a realização de uma análise ao potencial inerente ao recurso a algoritmos para o planejamento de rotas, em alternativa a processos de decisão mais intuitivos. Adicionalmente, é considerada a inclusão de uma componente previsional nesses algoritmos, com a qual se espera obter melhores resultados.

1.1 Metodologia

Para alcançar o objetivo indicado, foi definido um problema-modelo baseado na situação real considerada, e foram gerados cenários que se enquadram no problema definido.

Dados esses cenários, recorreu-se a um conjunto de algoritmos concebidos para identificar formas de se realizar a afetação de cargas a veículos de transporte

rodoviário de mercadorias, obtendo-se conjuntos de rotas. Posteriormente, analisaram-se os resultados obtidos pelos diferentes algoritmos.

Foram considerados cenários com características distintas, no sentido de se tirarem conclusões sobre o impacto que cada uma dessas características pode provocar no desempenho de cada um dos algoritmos usados.

1.2 Estrutura do Relatório

O presente relatório é constituído por nove capítulos.

No primeiro capítulo, é feita a introdução ao relatório e são indicados os objetivos propostos. É também apresentada a metodologia e a estruturação do relatório.

No segundo capítulo, são descritas consequências, positivas e negativas, da utilização dos vários modos de transporte, e referido o planeamento de rotas enquanto forma de tornar essa utilização mais eficiente. É sobretudo focado o transporte rodoviário de mercadorias. É também ilustrada a aplicação do planeamento de rotas, através de exemplos.

No terceiro capítulo, é apresentada a classe de problemas VRP, com referência a algumas das suas principais variantes, enquanto modelo para situações reais que envolvem o planeamento de rotas. Também se faz referência a métodos de resolução de problemas.

O quarto capítulo contém a descrição do problema considerado no presente trabalho. É distinguido o problema "dinâmico" do problema "estático".

No quinto capítulo é apresentada uma formulação matemática relacionada com o problema "estático" descrito no capítulo anterior.

No sexto capítulo é descrito o método usado para gerar as instâncias do problema considerado. São também caracterizadas as instâncias que foram consideradas para execução dos algoritmos.

O sétimo capítulo serve para apresentar e caracterizar cada um dos algoritmos implementados.

No oitavo capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos por cada um dos algoritmos, no conjunto de instâncias consideradas.

No nono, e último, capítulo, são apresentadas as principais conclusões.

2. Eficiência nos Transportes

Haverá a percepção generalizada de que os transportes desempenham um papel crítico na sociedade enquanto catalisadores da atividade económica, ao promover a competitividade das empresas e ao fornecer aos cidadãos soluções de mobilidade e de integração que contribuem para o acesso a oportunidades, sendo inclusivamente um dos pilares do processo de globalização, por permitir uma maior mobilidade de pessoas, bens e serviços. No entanto, o recurso intensivo aos transportes tem efeitos negativos, nomeadamente a degradação ambiental, os requisitos de energia e a contribuição para o aquecimento global, e o impacto na saúde humana.

Neste capítulo, procura-se primeiro fundamentar essa percepção através de referências a documentos e relatórios publicados por diversas instituições, e com perspetivas distintas sobre o tema, começando-se por se considerar os transportes de uma forma geral, focando-se depois o transporte rodoviário de mercadorias.

Na secção seguinte, é abordada a importância de uma gestão mais eficiente dos transportes para a promoção das vantagens, e minimização das desvantagens, que lhes são associadas. Nesse sentido, e seguindo uma lógica análoga à que é usada nas secções anteriores, recorrer-se-á a fontes distintas para apoiar o recurso a medidas que fomentem a eficiência nos transportes, focando, em particular, o planeamento de rotas associado ao transporte rodoviário de mercadorias.

2.1 Efeitos do Transporte

2.1.1 Modos de Transporte em Geral

Nos últimos anos, a União Europeia tem dado grande importância ao setor dos transportes, sendo várias as publicações em que são destacados os seus impactos, mas em que também é salientada a importância de tornar o setor mais eficiente. Exemplo disso é o livro branco lançado em 2011 intitulado "Roteiro do espaço único europeu dos transportes – Rumo a um sistema de transportes competitivo e económico em recursos" [6], sendo focada nesta publicação a importância dos transportes para o futuro da Europa e definido um conjunto de metas e medidas para as próximas décadas. A citação que se segue, que pode ser encontrada no referido relatório, ilustra a importância atribuída à eficiência no setor:

" A prosperidade futura do continente europeu dependerá da capacidade de todas as suas regiões para se manterem integradas e competitivas na economia mundial. Para o conseguir, são vitais transportes eficientes. "

Nos Estados Unidos da América, cujo governo gasta anualmente cerca de 300 mil milhões de dólares no setor dos transportes, é manifestado um entendimento similar sobre o tema. Faz-se referência a um relatório publicado em 2014 pela Casa Branca, intitulado "An Economic Analysis of Transportation Infrastructure Investment" [22], que começa com a seguinte descrição:

"Uma rede de transportes de elevada qualidade é vital para uma economia de topo. O investimento efetuado por gerações anteriores de Americanos [...] contribuiu para colocar o país no rumo do crescimento económico sustentável, do aumento de produtividade, de um mercado interno de bens e serviços inigualável, e da competitividade internacional" (tradução livre).

Como será expectável, não é apenas nas economias mais desenvolvidas que é atribuída tão elevada importância ao transporte. O Banco Mundial¹, cuja atividade foca o combate à pobreza extrema e a propagação da prosperidade a todos os países, também atribui um papel fundamental ao setor enquanto forma de alcançar os objetivos propostos:

"O transporte é um impulsionador crucial do desenvolvimento económico e social, abrindo oportunidades para os mais pobres e permitindo que as economias sejam mais competitivas. As infraestruturas de transporte aproximam as pessoas do emprego, da educação, e dos serviços de saúde; elas agilizam o fornecimento de bens e serviços em todo o mundo; e permitem que as pessoas possam interagir e

¹ <http://www.worldbank.org/en/topic/transport>

gerar conhecimento e soluções que promovam o crescimento de longo prazo. As estradas rurais, por exemplo, podem ajudar a prevenir a mortalidade materna ao agilizar o acesso a unidades de cuidados de saúde, intensificar a frequência de reparagens nas escolas, e aumentar e diversificar as receitas dos agricultores ao estabelecer ligações a mercados.” (tradução livre)

Em vários outros documentos e relatórios de diferentes organismos a nível mundial pode ver-se salientado o contributo positivo atribuído aos transportes numa perspetiva económica e social. Mas é também evidenciada uma crescente preocupação com os aspetos negativos inerentes.

O forte recurso aos transportes produz um elevado impacto ambiental, em particular pela contribuição das emissões no aumento da poluição atmosférica e no efeito de estufa, e portanto também ao nível de alterações climáticas. Nos EUA, de acordo com a EPA ²(*Environmental Protection Agency*), em 2013 as emissões GEE (gases com efeito de estufa) associadas aos transportes corresponderam a 27% do total de emissões GEE nesse país. Isso é ilustrado na Figura 1, em que são apresentadas as emissões por setor, podendo verificar-se que o setor energético teve a contribuição mais significativa, tendo registado 31% das emissões. Esse setor de atividade é o único a registar um impacto superior ao dos transportes.

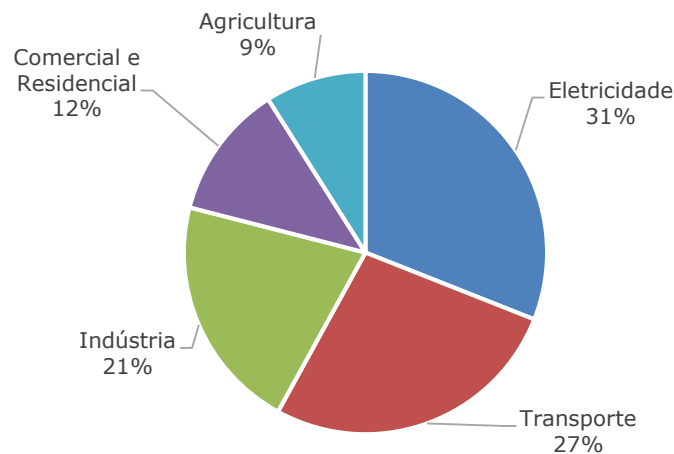


Figura 1 - Emissões GEE nos EUA por setor em 2013

Na Figura 2 é apresentada a distribuição de emissões GEE por setor de atividade na União Europeia, em 2012, de acordo com a EEA³ (*European Environment Agency*) [28]. Pode verificar-se que o setor dos transportes contribuiu em cerca de 24,3% das emissões GEE. À semelhança do que se verificou nos EUA em 2013, esse valor apenas

² <http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources.html>

³ <http://www.eea.europa.eu/>

2. Eficiência nos Transportes

foi ultrapassado pela indústria energética, à qual se atribui uma contribuição de 29,2%.

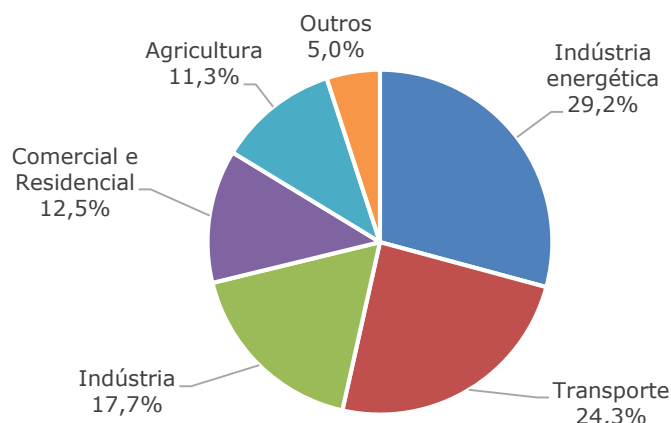


Figura 2 - Emissões GEE na UE por setor em 2012

No já referido livro branco, publicado pela União Europeia em 2011, várias das medidas definidas apontavam para uma redução significativa das emissões GEE nos transportes. A meta colocada para 2050 correspondia a uma redução de 60% face às emissões registadas em 1990. No entanto, as emissões no setor verificaram uma tendência ascendente até 2007, como é evidenciado no gráfico da Figura 3, sendo que nesse ano as emissões eram superiores às de 1990 em 36%. A partir de 2008 ocorreram sucessivas reduções das emissões no setor, mas o valor registado em 2012 é ainda significativamente superior ao de 1990, mais propriamente, em 20,5%, fazendo com que o objetivo definido para 2050 corresponda a uma redução dos valores de 2012 em cerca de 67%.

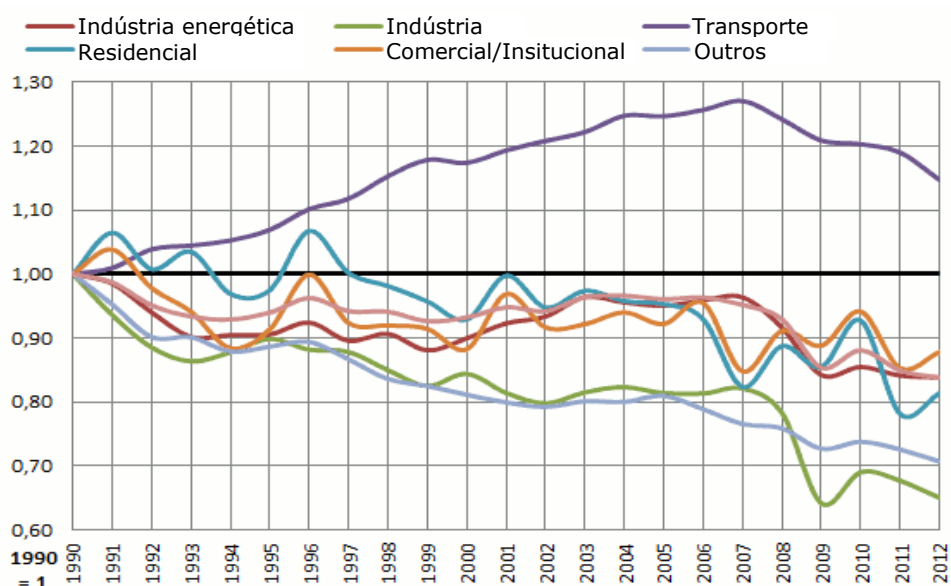


Figura 3- Evolução das emissões GEE do transporte e outros setores, 1990-2012

Outro aspeto que também será de salientar, também relativo ao gráfico da Figura 3 é apenas ter sido o setor dos transportes a registar um aumento nas emissões entre 1990 e 2012, sendo que os restantes setores viram as respetivas emissões de GEE reduzidas entre 10% a 35%. De acordo com a EEA, o aumento verificado até 2007 deveu-se a uma intensificação na utilização do transporte pessoal e de cargas, cujo impacto se sobrepôs ao dos progressos alcançados ao nível da eficiência das viaturas.

Considera-se importante realçar que o impacto ambiental tem também consequências a um nível económico-social. Disso é exemplo o impacto no efeito de estufa, na medida em que está associado a um aumento de desastres naturais, ou ainda o impacto ao nível dos sistemas hidrológicos, resultante das alterações climáticas que, ao afetar a disponibilidade de água, tem também impacto na produção de alimentos.

O impacto ambiental dos transportes ocorre também na forma de poluição sonora, pelas respetivas consequências para a saúde das populações, ou pela forte presença de infraestruturas com resultantes perturbações em ecossistemas. Será ainda de destacar a ocorrência de acidentes e as respetivas consequências, em que o meio rodoviário é particularmente significativo, provocando 1,24 milhões de mortes por ano, de acordo com a OMS (Organização Mundial de Saúde), o que o coloca como principal causa de morte para a faixa etária entre os 15 e os 29 anos.

2.1.2 Transporte Rodoviário de Mercadorias

Entre os vários meios de transporte, o rodoviário é muitas vezes focado pelo forte recurso ao mesmo a nível mundial, assumindo um papel central no fornecimento de soluções de mobilidade de pessoas, bens e serviços, mas estando também no centro das atenções quando se trata de aspetos negativos.

Tendo sido já referida a mortalidade associada a acidentes rodoviários, é agora abordado o impacto associado às emissões poluentes em que o transporte rodoviário também se destaca. De acordo com a OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico) [15], o transporte rodoviário está associado a 50% das mortes provocadas pela poluição atmosférica a nível mundial.

No que se refere a emissões GEE, e como se indica na Figura 4, na União Europeia o meio rodoviário está associado a 71,9% das emissões desse tipo registadas em 2012 para o setor dos transportes, valor muito superior à fatia correspondente aos restantes meios.

2. Eficiência nos Transportes

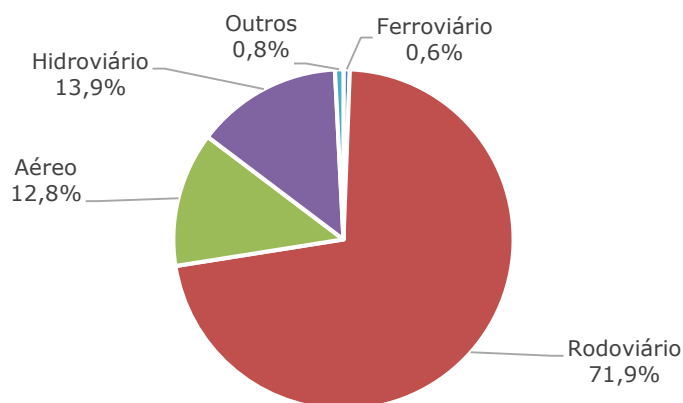


Figura 4 - Emissões GEE na UE por meio de transporte, 2012

Focando o transporte rodoviário de mercadorias, e procurando transmitir o seu peso na atividade, faz-se referência à Figura 5, em que se apresenta, para 2013, a utilização relativa a 5 meios, no transporte de mercadorias dentro da União Europeia. De acordo com a figura, o meio rodoviário corresponde a cerca de 50% do total de toneladas-quilómetro de carga transportada pelos meios identificados.

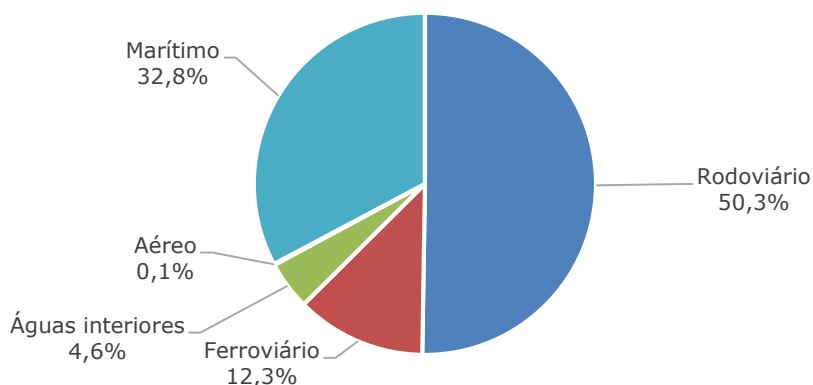


Figura 5 - Transporte de mercadorias na EU repartido por 5 meios de transporte, 2013 (% de tonelada-quilómetro)

Na Figura 6 é apresentada a distribuição das cargas transportadas por meio de transporte em 2012, agora para os EUA, com base no respetivo peso. De acordo com o "Transportation Statistics Annual Report" de 2013 [25], em cerca de 67% das mercadorias transportadas nesse ano recorreu-se exclusivamente ao meio rodoviário. Relativamente a estes dados, realça-se que os movimentos em que se recorreu a mais do que um meio foram englobados na categoria 'Multimodal', de forma a evitar a duplicação de registos. Considera-se que o meio rodoviário terá sido menos afetado face à sua flexibilidade e menor dependência do recurso a outros meios, ao contrário do que acontece, por exemplo, com o aéreo ou com o marítimo.

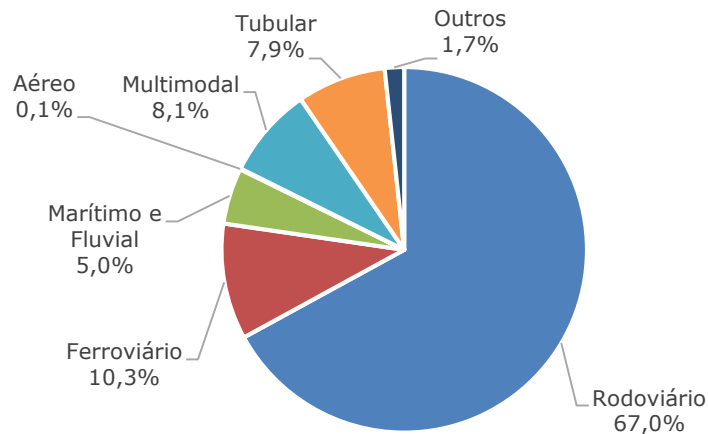


Figura 6 - Mercadorias transportadas por meio de transporte, 2012

2.2 Promoção da Eficiência nos Transportes

Poderão ser identificados várias medidas que podem contribuir para o aumento da capacidade de obter os benefícios associados ao transporte, ou para a redução de impactos negativos. Isso pode ser alcançado, por exemplo, atuando ao nível das infraestruturas, ou através da inovação tecnológica aplicada às viaturas, mas também, e com particular relevância para o âmbito deste trabalho, através de uma gestão mais eficiente dos recursos disponíveis.

É nesse contexto que o planeamento de rotas se enquadra, enquanto forma de permitir que sejam usadas rotas mais eficientes, proporcionando um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, em particular das viaturas.

Em seguida, será abordada a importância atribuída à adoção de medidas que promovam a eficiência no transporte, através de diversas referências, com particular destaque para o planeamento de rotas e para o meio rodoviário, considerando que é aí que este trabalho se centra.

2.2.1 Modos de Transporte em Geral

Nos últimos anos a União Europeia contribuiu para vários projetos que visam alcançar melhorias de eficiência no transporte, o que ilustra a importância que atribui ao tema. Disso são exemplos o RIS ⁴(*River Information Services*), que contribui para a otimização de tráfego e gestão de processos de transporte para a navegação em águas interiores, ou o SESAR (*Single European Sky ATM Research*), cujo objetivo é contribuir para melhorar a gestão de tráfego aéreo a nível europeu, e que se prevê

⁴ <http://www.ris.eu/>

que vá permitir significativos benefícios para o ambiente, reduções de custos, melhorias na utilização da capacidade disponível, e maiores níveis de segurança.

Focando o setor do transporte aéreo, agora numa perspectiva empresarial, faz-se referência a um artigo contido numa edição de 2009 da revista AERO, publicada pela Boeing⁵, intitulado '*Effective Flight Plans Can Help Airlines Economize*'. Neste artigo, escrito por um cientista sénior da Jeppesen, uma subsidiária da construtora aeronáutica, são focados os benefícios económicos que resultam do melhoramento de planos de voo. É também indicado que a otimização de planos de voo pode reduzir o consumo anual de combustível em milhões de litros, sem que isso comprometa horários ou níveis de serviço, sendo também abordada a redução de emissões com impacto ambiental.

A Maersk Line⁶, líder mundial em serviços de transporte marítimo de contentores, e que opera uma frota com mais de 600 navios, define a redução de emissões como um objetivo estratégico. Nesse sentido, em 2007 a empresa propôs-se a alcançar uma redução global nas emissões de CO₂ em 25% até 2020, tendo atingido essa meta em 2012, altura em que a redefiniu para uma redução de 40% sobre os valores de 2007. É também apontado que essa redução, acompanhada de um crescimento previsto de 80% no volume transportado, também em relação a 2007, corresponde a uma redução de 60% nas emissões de CO₂ por contentor, passando-se de 76.9 g/km para 30.8 g/km.

No relatório '*Sustainability Update 2014*' [14], a Maersk Line destaca que um dos meios indispensáveis para alcançar os objetivos propostos incide sobre a otimização operacional, enquadrando-se nesse contexto a conceção da rede e a otimização de velocidades. No mesmo relatório, é ainda destacada a importância da monitorização permanente da frota, realizada a partir do Maersk Line Global Voyage Centre, sediado em Mumbai, em que se recorre a *big data* atualizada em tempo real para o planeamento e execução de viagens mais eficientes, promovendo-se desta forma a otimização da rede e a obtenção de reduções no consumo de combustível e nas emissões de CO₂.

Faz-se ainda referência à UPS⁷ (*United Parcel Service*), uma marca reconhecida a nível mundial, especializada no fornecimento de serviços logísticos, e que recorre aos meios de transporte terrestre, marítimo e aéreo. A sua presença em mais de 220 países, e o volume diário de entregas na ordem dos 18 milhões de pacotes e documentos, ilustram a sua dimensão e a resultante complexidade a nível

⁵ <http://www.boeing.com/>

⁶ <http://www.maerskline.com/>

⁷ <http://www.ups.com/>

operacional. Esta empresa manifesta uma forte aposta na inovação tecnológica para alcançar melhorias em várias dimensões da sua operação, com resultantes benefícios organizacionais, em que se enquadra uma perspetiva ambiental. Nesse sentido, a UPS tem feito um forte investimento em soluções tecnológicas, em que será de destacar o ORION (*On Road Integrated Optimization and Navigation*), uma ferramenta desenvolvida pela empresa para otimizar o processo de recolha de dados, e o respetivo processamento, de forma a promover a eficiência de rotas e ganhos ao nível do desempenho da sua frota.

A UPS estima que entre 2012, ano em que deu início à implementação progressiva do ORION, e 2016, ano em que prevê que essa solução esteja em pleno funcionamento, o ORION irá permitir uma redução anual média de 160 milhões de quilómetros na distância total percorrida pelas viaturas usadas, com uma poupança de combustível na ordem dos 38 milhões de litros, e menos 100 mil toneladas de emissões de CO₂ [24].

2.2.2 Transporte Rodoviário de Mercadorias

No transporte rodoviário de mercadorias a importância atribuída à implementação de soluções que permitam uma utilização mais eficiente de recursos, por parte da União Europeia, é ilustrada pelo projeto BESTUFS – “BEST Urban Freight Solutions” [3]. Esta iniciativa, que se manteve ativa entre 2000 e 2008, tinha como objetivo primário “identificar, descrever e disseminar boas práticas, critérios de sucesso e estrangulamentos das soluções para o transporte urbano de mercadorias”. Uma das principais conclusões apontadas pelo projeto foi ter sido identificado em diversas cidades um contacto reduzido com os progressos no setor da logística, em particular na distribuição urbana, e pouco conhecimento das inovações ao nível operacional e técnico, apontando-se a gestão de tráfego como exemplo.

Entre 2012 e 2014, a AECOM⁸ elaborou o relatório ‘*Collection and Analysis of Data on the Structure of the Road Haulage Sector in the European Union*’ [1], para o qual recolheu e analisou informação sobre o transporte rodoviário de mercadorias na União Europeia. Neste documento, são salientadas as potenciais ineficiências que podem resultar do planeamento de rotas, não apenas na fase do planeamento propriamente dito, mas também na sua execução, e apresentado o recurso a soluções informáticas como forma de alcançar maiores níveis de eficiência. É também referido que será nas maiores empresas da área dos transportes que existe o potencial para alcançar mais benefícios com o recurso a este tipo de soluções, sendo apontado que em empresas com dez ou mais viaturas estão reunidas condições para se beneficiar

⁸ <http://www.aecom.com/>

das vantagens resultantes da implementação dessas soluções, habitualmente na ordem dos 10% a 15% de ganhos em eficiência.

No relatório '*Towards a resource-efficient transport system*' [9], publicado pela Agência Europeia do Ambiente, é salientada a importância de alcançar melhorias no desempenho logístico, como forma de reduzir as emissões de GEE. Ao nível do transporte rodoviário de mercadorias, são apontados como objetivos o melhoramento da utilização de viaturas, e a redução de distâncias médias percorrida, sendo ainda apontados benefícios decorrentes da consolidação de cargas e do recurso à multimodalidade.

O já referido livro branco "Roteiro do espaço único europeu dos transportes – Rumo a um sistema de transportes competitivo e económico em recursos" [6] também menciona a consolidação de cargas e a multimodalidade, enquanto ferramentas para se atingir uma maior eficiência dos transportes, sem que ocorram reduções ao nível da mobilidade. Se por um lado o recurso à consolidação e à multimodalidade permite que no processo de planeamento de rotas estejam disponíveis alternativas capazes de permitir reduções de custos, por outro, o maior número de alternativas a considerar conduz a uma maior complexidade na decisão e fortalece a necessidade de ganhos em eficiência como forma de evitar uma deterioração a nível da competitividade.

Faz-se agora referência a alguns casos de sucesso resultantes da implementação de soluções de otimização de rotas fornecidas por empresas que oferecem esse tipo de serviços. Um primeiro exemplo é a implementação de *software* da Paragon⁹ no Co-operative Group, uma cooperativa britânica que opera ao nível do retalho alimentar, entre outras áreas. A Co-operative Food serve cerca de 4000 estabelecimentos, com 1300 viaturas a executar 9500 rotas por semana. De acordo com um responsável pelo planeamento da Co-operative Food, a implementação desta solução numa fase piloto alcançou uma redução em 5% na distância total percorrida, e justifica uma redução prevista de emissões CO₂ na ordem das 5 mil toneladas anuais.

A Coca-Cola Korea Bottling Company, líder no mercado de bebidas na Coreia do Sul e com uma linha de produtos superior a 120 SKU (*Stock Keeping Unit*), implementou uma solução fornecida pela Descartes¹⁰ com a qual se reduziu em 30% a distância percorrida por viatura, permitindo uma redução do número de viaturas necessárias em 11%. Também se alcançou um aumento na capacidade de

⁹ <http://www.paragontruckrouting.com/case-studies/co-operative-cuts-food-miles-and-co2>

¹⁰ <https://www.descartes.com/documents/customer-success-coca-cola-korea>

fornecimento da frota em 13%, reduzindo-se, em simultâneo, a ocorrência de ruturas de *stock*.

Na Índia, o recurso aos serviços da Optirisk¹¹ permitiu a uma multinacional da área de distribuição de combustíveis uma redução superior a 23% nos custos de transporte, e melhorias nos níveis de serviço com resultante aumento na satisfação dos clientes. É ainda apontado que o tempo necessário para o planeamento foi reduzido em 70% a 90%.

A Schweppes australiana recorreu à Biarri¹² para a gestão de uma frota com mais de 100 viaturas. Além de redução no tempo necessário ao processo de planeamento, foi alcançada uma redução de 10% na distância percorrida, com resultantes reduções no consumo de combustível e na fadiga dos motoristas, permitindo também reduzir o número de viaturas necessárias para satisfazer a procura.

Saliente-se também que a aplicação do planeamento de rotas ao transporte rodoviário de cargas não se restringe a mercadorias, podendo ser identificadas referências ao planeamento de rotas noutras áreas de operação. Num relatório publicado pela EPA em 1999 intitulado '*Getting more from less – Improving Collection Efficiency*' [10], é atribuída particular relevância à necessidade e aos benefícios da utilização de melhores rotas na recolha de resíduos. Nesse documento são apontados diversos benefícios resultantes do recurso a *software* de gestão de rotas, como a redução de custos, alcançada através de redução de necessidades de veículos e de mão-de-obra, ou do nivelamento na distribuição de trabalho.

2.3 Planeamento de Rotas

Nesta secção, procura-se caracterizar o planeamento de rotas, enquanto processo de decisão, do ponto de vista de uma empresa que presta serviços de transporte rodoviário de mercadorias. Começa-se por referir objetivos que poderão estar associados ao processo, mas que estão sujeitos a determinadas limitações, quer ao nível dos recursos da empresa, quer numa perspetiva externa à mesma. Após essa caracterização, são apresentados alguns exemplos.

2.3.1 Objetivos do Planeamento de Rotas

Quando se define um conjunto de rotas, a obtenção de menores custos, ou de maiores lucros, serão objetivos particularmente comuns. Podem estar presentes outros objetivos, como obter rotas em que se percorrem distâncias mais curtas, que

¹¹ <http://www.optiriskindia.com/solutions/transport-optimization>

¹² <http://biarri.com/portfolio-item/vehicle-routing-optimisation-schweppes/>

sejam mais rápidas, com melhores taxas de ocupação, com menor impacto ambiental, ou que assegurem determinado nível de satisfação de clientes ou utilizadores do serviço, para referir alguns exemplos.

Neste trabalho, é focado o transporte rodoviário de mercadorias, e considerada a perspetiva de uma empresa que se dedica ao fornecimento desses mesmos serviços. Os objetivos acima referidos enquadram-se neste contexto. Relativamente ao nível de satisfação de clientes, em particular, poderá ser considerado relevante o cumprimento de prazos ou horários de visita acordados com clientes.

Ao procurar definir rotas que vão de encontro aos objetivos definidos, há um conjunto de constrangimentos que terão de ser considerados. Esse conjunto de constrangimentos não será o mesmo para todas as empresas, podendo variar em função dos objetivos definidos, da informação relevante que esteja disponível, ou de outras características associadas à atividade de cada empresa.

2.3.2 Condicionantes no Planeamento de Rotas

No planeamento de rotas existe uma diversidade de condicionantes que poderão estar presentes. Pode começar-se por referir, numa perspetiva interna, a limitação de recursos ao dispor da empresa. O número de veículos e as suas capacidades, ou o número de colaboradores com determinadas características, são exemplos de recursos limitados, estando as rotas definidas sujeitas a essas limitações.

Por outro lado, existem também fatores externos, como é o caso das infraestruturas existentes, características associadas às cargas ou às pessoas transportadas, aspetos legislativos que poderão intensificar os constrangimentos provocados por outros fatores, ou ainda aspetos associados aos clientes ou utilizadores que recorrem a serviços de transporte com o objetivo de atingir determinada finalidade.

Uma empresa terá um número limitado de viaturas e de motoristas disponíveis, podendo também existir a possibilidade de subcontratar serviços. Adicionalmente, é relevante considerar as características de cada viatura, como a respetiva capacidade e o seu consumo, mas também aspetos associados aos motoristas, como o seu histórico de atividade recente, face aos constrangimentos legais associados a tempos de condução e repouso.

Existe uma rede rodoviária, em que diferentes tipos de via correspondem a diferentes limites de velocidade, variando esses limites também em função das viaturas usadas. Existem ainda restrições à circulação de determinado tipo de

viaturas, em particular, a pesos de mercadorias, associadas a determinadas vias, regiões, ou tipos de construção como pontes e túneis.

No cenário que é considerado, a empresa é contactada por potenciais clientes, que pretendem o transporte de determinada carga, de um local para outro. Além da quantidade a transportar, e da localização dos locais de carga e de descarga, estarão associados a cada pedido horários, para cada um dos locais, podendo ainda haver características relevantes associadas ao tipo de carga.

A empresa terá uma sede ou armazém central, que poderá servir como armazenagem temporária de cargas. Podem ocorrer transbordos de cargas entre viaturas, o que poderá ir de encontro aos objetivos definidos. Existe ainda a possibilidade das viaturas terem dois motoristas, o que pode reduzir o impacto das restrições provocadas pela legislação.

Face ao acima apontado, é essencial que o decisor disponha de informação atualizada. Por um lado, existe toda a informação associada à disponibilidade de recursos, os pedidos já integralmente ou parcialmente satisfeitos, os pedidos que surgiram após a última definição de rotas, toda a caracterização relevante desses pedidos, e também os aspetos legais em que se incluem as regras de circulação das viaturas e os tempos de condução e repouso dos motoristas, sendo aqui relevante conhecer-se, além de informação presente, também informação sobre atividade recente de motoristas e viaturas.

Note-se ainda que este processo decisional não é estático. No decorrer da atividade vão surgindo vários momentos em que o processo ocorre, e o conjunto de rotas definido em cada um desses momentos irá afetar decisões posteriores. A decisão tomada em cada momento determina, ainda que não exclusivamente, a utilização que os recursos irão ter num futuro próximo, e que tendencialmente irá abranger vários momentos em que se vão definir novas rotas, o que poderá passar por alterações em rotas já existentes.

Face ao apontado acima, torna-se relevante que, além de informação atual e de um histórico, se procure conhecer informação futura. A utilização de métodos de previsão, que podem englobar técnicas de reconhecimentos de padrões, aplicadas ao histórico e a outra informação que possa estar disponível, poderão fornecer informação relevante sobre o futuro, permitindo que quando se define um conjunto de rotas, se possa também considerar o impacto em momentos de decisão futuros, existindo assim um maior potencial para que se consiga um melhor desempenho global, com vista ao alcance dos objetivos definidos.

2.3.3 Exemplificação

É ilustrado o funcionamento do planeamento de rotas, através de dois exemplos. Em ambos é considerado apenas um veículo, que num instante inicial se encontra na sede ou num armazém da empresa, e existem locais que se quer visitar. O que se pretende, é definir uma rota para o veículo em questão em que todos os locais sejam visitados, em que se minimize a distância percorrida pelo veículo. Após a última dessas visitas, a rota termina com o regresso do veículo ao armazém. Por uma questão de simplificação, estão a ser excluídas várias das condicionantes já referidas, como é o caso da capacidade de carga do veículo.

No primeiro exemplo, ilustrado na Figura 7, é conhecido um conjunto de sete locais, que não estão relacionados entre si. Na figura são apresentadas duas rotas alternativas que vão de encontro ao pretendido, estando o local '0' a representar um armazém que coincide com o início e fim da rota. O que se procura ilustrar, é que a definição de uma rota de um modo empírico, sem recurso a métodos adequados, pode não permitir identificar a melhor rota, mesmo numa situação que se possa considerar simples. Num cenário desta dimensão e simplicidade, a utilização de ferramentas apropriados para o efeito, poderão identificar a melhor solução em poucos segundos, com a mais-valia de se ter a garantia de que efetivamente se obtém a melhor solução para o problema.

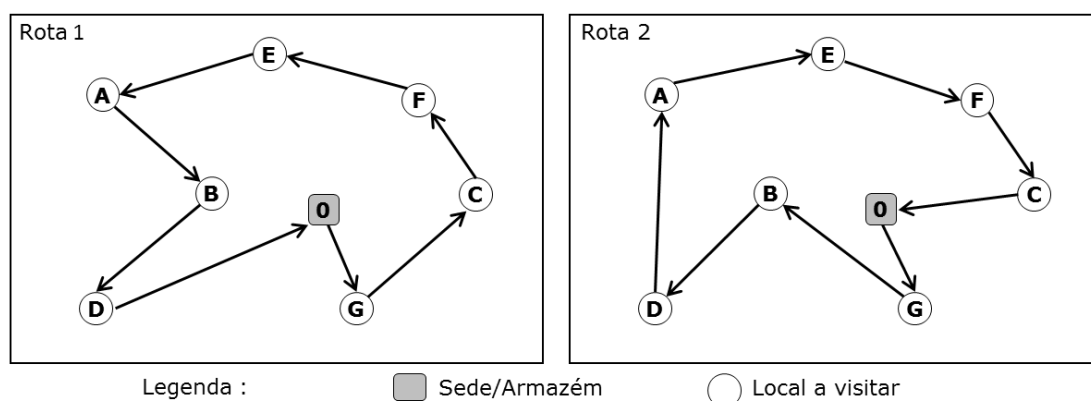


Figura 7 – Planeamento de rotas sem componente dinâmica

No caso de estar disponível uma frota com dezenas de veículos, de haver centenas de locais a visitar, e em que estejam presentes algumas das condicionantes já referidas, os benefícios de recorrer a ferramentas adequadas aumenta exponencialmente.

Na Figura 8 é ilustrado um segundo exemplo, baseado em Pillac [17], em que parte dos locais a visitar são conhecidos num instante inicial, havendo outros que só são conhecidos após se iniciar a rota.

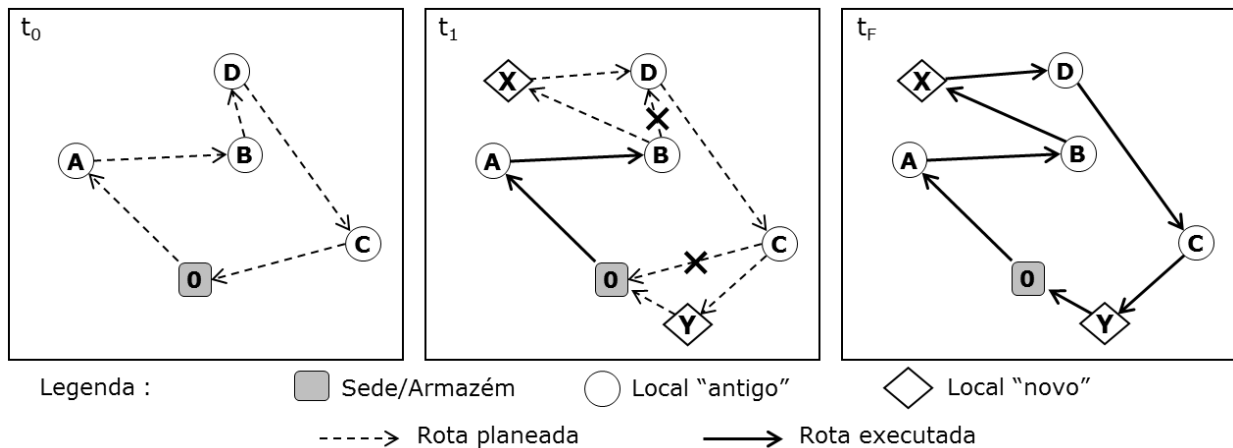


Figura 8 – Planejamento de rotas com componente dinâmica

Na Figura 8 é representado um instante inicial, t_0 , em que se conhecem quatro locais a visitar pelo veículo, e é definida uma rota. Num instante posterior, surge nova informação sobre dois locais que devem ser visitados, o que provoca alterações à rota anteriormente definida, obtendo-se então a rota que é efetivamente executada.

Havendo a possibilidade de se recorrer a um método de realizar previsões que produza bons resultados, a sua integração no processo de decisão pode permitir a obtenção de rotas com maior capacidade de resposta ao surgimento de nova informação. A presença desta componente dinâmica, juntamente com a sua incorporação no processo de decisão, são aspetos particularmente relevantes no âmbito deste trabalho.

3. Enquadramento Teórico

A Investigação Operacional é um ramo da Matemática Aplicada em que se recorre a um conjunto de métodos analíticos para a resolução de problemas e apoio à tomada de decisão. O sucesso na implementação de técnicas de Investigação Operacional em situações reais está fortemente dependente dos avanços ao nível das tecnologias de informação, beneficiando também da evolução na capacidade de recolha, tratamento e análise de dados.

Um aspeto igualmente fulcral, é o trabalho que tem vindo a ser desenvolvido ao longo de várias décadas, quer em termos de modelação dos problemas, quer nos algoritmos usados na abordagem a esses problemas.

Na literatura podem ser identificados diversas variantes de modelos que se podem ajustar ao planeamento de rotas. Descrevem-se, em seguida, algumas dessas variantes, que se consideram particularmente abrangentes, procurando-se enquadrar o problema considerado neste trabalho. A incerteza associada à informação, presente numa situação real, também é contemplada na literatura, e é abordada na secção 6.4.

Na secção 6.5 referem-se alguns métodos de resolução de problemas considerados em Investigação Operacional, sendo destacados aqueles que são mais relevantes no contexto deste trabalho.

3.1 TSP

Na sua forma mais comum, o Problema do Caixeiro-viajante (TSP – *Traveling Salesman Problem*) pressupõe a existência de um conjunto pré-definido de locais que um Caixeiro-viajante irá visitar, sendo conhecidas as distâncias entre esses locais. O objetivo do problema é identificar o percurso que permita que o Caixeiro-viajante visite todos os locais, e regresse ao ponto de partida, percorrendo a menor distância possível.

Este problema é um dos mais estudados na área da Investigação Operacional, não se conhecendo a sua origem. No contexto do presente trabalho, o TSP é revelante por corresponder a uma versão particularmente simplificada de um outro problema, o VRP (*Vehicle Routing Problem*), que é descrito na seção seguinte.

3.2 VRP

Um Problema de Roteamento de Veículos, ou VRP, pode ser visto como uma generalização do TSP. O VRP foi introduzido por Dantzig e Ramser [7], em 1959, como forma de abordar a otimização de rotas para uma frota de camiões cisterna utilizados na distribuição de combustível por um número elevado de postos de abastecimento, a partir de um terminal comum, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida pelos veículos.

À semelhança do que acontece no TSP, para o VRP são conhecidas as distâncias entre os locais envolvidos, e todos os locais terão de ser visitados. No entanto, neste caso são considerados múltiplos veículos, sendo conhecida a capacidade de carga de cada um deles, e estando associada a cada local uma procura pelo bem que está a ser distribuído. Note-se que no caso da procura total ser inferior à capacidade de pelo menos um dos veículos, e uma vez que o objetivo não envolve o tempo necessário para efetuar todas as visitas, este problema corresponde ao TSP, na medida em que um único veículo é suficiente para satisfazer toda a procura sem ser necessário regressar ao terminal durante a realização do percurso.

Acrescenta-se que, em alternativa a considerar uma matriz de distâncias, poderá estar presente uma matriz de custos ou de durações, associadas ao percurso entre cada par de locais. Nesses cenários, o objetivo passará a ser a identificação da rota de menor custo ou de menor duração, respetivamente.

3.3 Variantes do VRP

Na literatura são habitualmente identificadas duas perspetivas distintas sobre o que corresponde a um VRP. Por um lado, o VRP pode ser definido como uma classe

de problemas [23], mas pode também ser visto como um problema com uma caracterização mais específica [18] e que, na primeira perspetiva, corresponde ao CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem*), que será posteriormente definido.

Existe uma grande diversidade de variantes do VRP, que se distinguem pelo conjunto de restrições consideradas em cada uma. A Figura 9, adaptada de Toth e Vigo [23], identifica e relaciona algumas das principais variantes do VRP. Em seguida, são descritas as variantes do VRP identificadas na Figura 9.

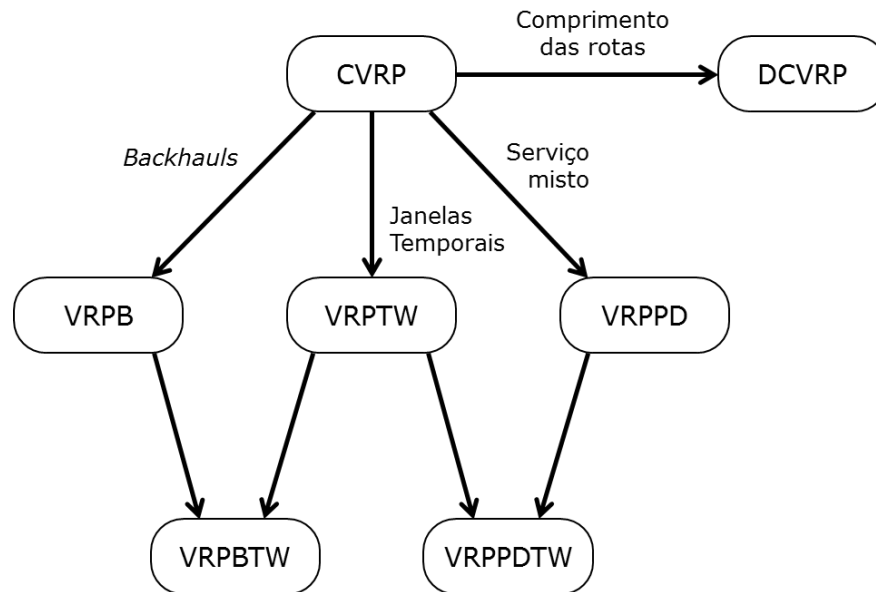


Figura 9 - Relação entre problemas básicos da classe VRP

3.3.1 CVRP

Esta variante corresponde ao problema apresentado por Dantzig e Ramser [7], no caso particular em que todos os veículos têm a mesma capacidade. Como foi já referido, a cada local está associada uma procura, sendo necessário definir um conjunto de rotas que permitam responder a essas procuras, de forma a minimizar o seu custo global.

É também definido um número de veículos disponíveis, o que impõe um limite máximo para o número de diferentes rotas que se podem definir, na medida em que cada um dos veículos não poderá estar associado a mais do que uma rota. Pode, no entanto, haver veículos que não estejam associadas a nenhuma rota, o que faz com que não esteja explicitado um limite mínimo para o número de rotas necessárias.

Podem encontrar-se na literatura algumas variações relativamente ao acima descrito. Em particular, poderão ser considerados custos associados à utilização de veículos, ou poderão ser atribuídas diferentes capacidades aos veículos disponíveis.

Note-se que neste problema se pode considerar que os veículos estão a proceder a recolhas nos vários locais, em alternativa ao estarem a fazer uma distribuição, e que as quantidades associadas a cada local se referem à quantidade a recolher, e não a uma procura.

3.3.2 DCVRP

No CVRP o conjunto de locais visitados por cada rota ficará limitado pela soma das procuras associadas aos locais, que não poderá ser superior à capacidade definida para o veículo que percorre essa rota. Em alternativa a esse tipo de restrições, no DVRP (*Distance-Constrained Vehicle Routing Problem*) cada rota fica limitada por um valor máximo para o comprimento, ou duração, de cada rota. A grandeza associada a esse limite poderá, ou não, corresponder à grandeza que se pretende minimizar. Pode considerar-se, por exemplo, que é pretendido minimizar os comprimentos das rotas, e que o limite definido é sobre a duração de cada rota.

À semelhança do que foi indicado relativamente às capacidades dos veículos no CVRP, no DVRP pode definir-se que existe um limite comum a todos os veículos, ou considerar-se que os veículos são diferentes fazendo com que as rotas tenham associados diferentes valores máximos.

As restrições associadas ao CVRP e as associadas ao DVRP poderão ser consideradas em conjunto, usando-se a sigla DCVRP (*Distance-Constrained Capacitated Vehicle Routing Problem*) para o problema obtido.

3.3.3 VRPTW

Uma outra restrição frequentemente considerada nesta classe de problemas, envolve a incorporação de limites para os momentos em que podem ocorrer as visitas aos locais considerados. Mais propriamente, no VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*) fica associado um intervalo de tempo a cada local, definido por um instante inicial e um instante final, fora do qual o local não pode ser visitado por nenhum dos veículos.

Nesta variante é admitida a possibilidade dos veículos poderem chegar a determinado local antes do instante em que a janela temporal se inicia, mas isso leva o veículo a esperar por esse instante antes de prosseguir para um próximo local. Também se pode associar uma janela temporal ao armazém, o que tem impacto nas restantes visitas, uma vez que estas não podem comprometer o cumprimento da janela temporal associada ao armazém.

Adicionalmente, pode estar associado a cada local um tempo de serviço. Nesse caso, quando um veículo visita determinado local deverá permanecer no local durante

um período não inferior ao respetivo tempo de serviço. Note-se que apesar de um veículo poder chegar a um local antes do início da respetiva janela temporal, o serviço em si terá que começar dentro da janela temporal.

Em alternativa a não serem permitidas visitas fora das janelas temporais, são frequentemente consideradas janelas temporais flexíveis. Nessa vertente é permitido que as visitas ocorram fora da janela, mas numa solução em que isso aconteça são aplicadas penalizações no valor objetivo.

3.3.4 VRPB

Como já referido, o CVRP poderá ser aplicável tanto à distribuição como à recolha de cargas. No VRPB (*Vehicle Routing Problem with Backhauls*), os veículos procedem simultaneamente a recolhas e a entregas. O conjunto de locais considerados reparte-se entre locais em que ocorre exclusivamente uma recolha, designados por clientes *backhaul*, e locais em que ocorre exclusivamente uma entrega, designados por clientes *linehaul*, estando associada a cada um desses locais determinada quantidade do bem a recolher, ou a entregar, respetivamente.

Analogamente ao que se verifica nas variantes anteriores, cada rota começa e termina num armazém. Faz-se notar que, apesar de uma rota poder englobar ambos os tipos de cliente, não existe uma correspondência entre os bens recolhidos e os bens entregues, isto é, nenhum dos bens recolhidos em clientes *backhaul* será entregue em algum dos clientes *linehaul*. Resulta que um veículo que efetue alguma recolha irá regressar ao armazém carregando toda a quantidade recolhida, e um veículo que efetue alguma entrega irá iniciar a rota carregando toda a quantidade a entregar. Desta forma, quer o conjunto de clientes *linehaul*, quer o conjunto de clientes *backhaul*, visitados em determinada rota, ficam limitados pela capacidade do veículo que a percorre.

Neste problema, sempre que uma rota englobe visitas a ambos os tipos de clientes, é exigido que todas as visitas a clientes *linehaul* ocorram antes das visitas a clientes *backhaul*. Adicionalmente, poderão ser impedidas rotas exclusivamente compostas por visitas a clientes *backhaul*.

3.3.5 VRPPD

O VRPPD (*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*) é semelhante ao VRPB na medida em que o conjunto de locais se reparte por locais de recolha, ou carga, e locais de entrega, ou descarga. No entanto, nesta variante existe uma relação entre locais dos dois tipos, em que cada par constituído por um local de entrega e um local de recolha corresponde a um pedido.

Para cada local é conhecida uma quantidade a recolher ou a entregar. Pode definir-se que, para cada pedido, a quantidade a entregar e a quantidade a recolher são iguais, ou podem ser admitidas diferenças entre essas quantidades. No segundo caso, podem obter-se rotas em que a quantidade total a entregar é superior à quantidade total a recolher, o que faz com que o veículo que faz essa rota tenha de partir do armazém carregado, ou rotas em que a quantidade a recolher é superior à quantidade a entregar, levando a que o veículo regresse ao armazém carregado.

Um pedido não pode ser satisfeito por mais do que um veículo. Mais propriamente, para cada pedido, não pode haver um veículo a visitar o local de carga, e outro veículo a visitar o local de descarga. Adicionalmente, é necessário que a visita ao local de carga ocorra antes da visita ao respetivo local de descarga.

Nesta variante, continuam a ser consideradas as restrições de capacidade. Em termos de objetivos, também se mantêm a minimização da distância, da duração ou do custo das rotas.

3.3.6 VRPBTW e VRPPDTW

Podem ser identificadas muitas outras variantes do VRP, algumas das quais agregam restrições dos problemas acima descritos. No VRPBTW (*Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows*) e no VRPPDTW (*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery and Time Windows*), por exemplo, incorpora-se a presença de janelas temporais, associadas aos locais a visitar, às restrições já consideradas no VRPB e no VRPPD, respetivamente.

3.4 Categorização do VRP

Nas descrições aqui apresentadas de variantes do VRP, é considerado que toda a informação necessária para abordar o problema é previamente conhecida, e não está sujeita a alterações. No entanto, numa situação real de planeamento, é necessário lidar com incerteza relativamente à informação disponível.

Na literatura [18] são identificadas duas dimensões usadas para classificar estes tipos de constrangimento: a evolução e a qualidade da informação. A evolução da informação diz respeito às alterações que poderão ocorrer na informação inicialmente considerada, por exemplo, pelo surgimento de novos serviços, ou pelo cancelamento de serviços, durante a fase de execução. Por sua vez, a qualidade da informação está associada à incerteza sobre a informação que está disponível. A Tabela 1 apresentada quatro categorias distintas caracterizadas a partir das duas dimensões referidas.

		Qualidade da informação	
		Conhecimento de dados determinístico	Conhecimento de dados estocástico
Evolução da informação	<i>Input</i> conhecido com antecedência	Estático Determinístico	Estático Estocástico
	<i>Input</i> alterado ao longo do tempo	Dinâmico Determinístico	Dinâmico Estocástico

Tabela 1 – Taxonomia de problemas de roteamento de veículos com base na evolução e na qualidade da informação

No problema abordado neste trabalho, o qual será descrito no Capítulo 4, considera-se que vão sendo introduzidos novos pedidos ao longo do tempo. No entanto, a qualidade da informação é assegurada, na medida em que a partir do momento em que um pedido é conhecido e caracterizado não são contempladas quaisquer alterações à respetiva caracterização. Assim, e com base no esquema representado na Tabela 1, o problema enquadra-se na categoria Dinâmico Determinístico.

3.5 Métodos de Resolução

Existe uma grande diversidade de métodos concebidos para abordar problemas considerados em Investigação Operacional, podendo ser considerados dois conjuntos. Os métodos exatos permitem identificar uma solução ótima, ou seja, uma solução cujo valor objetivo não é superado por nenhuma outra solução. Em problemas como o VRP, classificados como NP-difíceis, o tempo necessário para a execução dum método exato aumenta exponencialmente quando se aumenta a dimensão do problema, por exemplo, ao considerar um maior número de locais. Isto faz com que a utilização deste tipo de métodos possa não ser viável, na medida em que estes podem não fornecer resultados em tempo útil.

Por outro lado, existem métodos, designados por heurísticas, que permitem tempos de execução significativamente inferiores aos que se verificam nos métodos exatos. O recurso a heurísticas não garante que seja obtida uma solução ótima, no entanto a sua aplicação pode conduzir a soluções “boas” em tempo útil. Existe uma classe de heurísticas, designadas por metaheurísticas, que têm recebido particular atenção nas últimas décadas, e que consistem em estruturas empregues na aplicação de heurísticas.

Foram concebidas e implementadas duas heurísticas no âmbito do trabalho desenvolvido. A primeira é uma heurística de inserção, que consiste em realizar inserções sequenciais de pedidos em rotas. A segunda é um Algoritmo Genético, uma metaheurística usada frequentemente na abordagem a problemas da classe VRP, em

3. Enquadramento Teórico

que as soluções são vistas como indivíduos de uma população. Num Algoritmo Genético, começa-se por construir um primeiro conjunto de indivíduos, ou de soluções, que se designa por população inicial. Depois é aplicado um processo iterativo em que os indivíduos de cada população são modificados para se obter a população da geração seguinte. Ambas as heurísticas implementadas são descritas no Capítulo 7 do presente relatório.

Parte II – Metodologia

4. Definição do Problema
5. Formulação
6. Instâncias
7. Algoritmos

4. Definição do Problema

A situação que se considera neste trabalho tem características contempladas num VRPPDTW. Pretende-se definir um conjunto de rotas para uma frota homogénea de veículos. Existem pedidos de clientes, e a cada pedido está associada uma quantidade, um local de carga e um local de descarga. Para cada local existe uma janela temporal, e pode estar associado um tempo de serviço. É conhecida a localização de um armazém único que terá de corresponder ao início e fim de qualquer rota definida.

Adicionalmente, está presente uma componente dinâmica. Assim, os pedidos a satisfazer vão sendo conhecidos ao longo do tempo, impondo-se a necessidade de tomar decisões em vários momentos, de forma a permitir que todos os pedidos possam ser considerados, como se procura ilustrar na Figura 10.

Considera-se que será conveniente distinguir duas perspetivas. Por um lado, tem-se um problema dinâmico, em que se considera todo um horizonte temporal, mas pode ser identificado um problema estático, associado a cada um dos momentos em que é tomada uma decisão. Para evitar ambiguidades, ir-se-á denominar o primeiro problema como "meta-problema", enquanto a designação "problema" será usada para fazer referência ao problema estático, que se irá verificar em vários momentos.

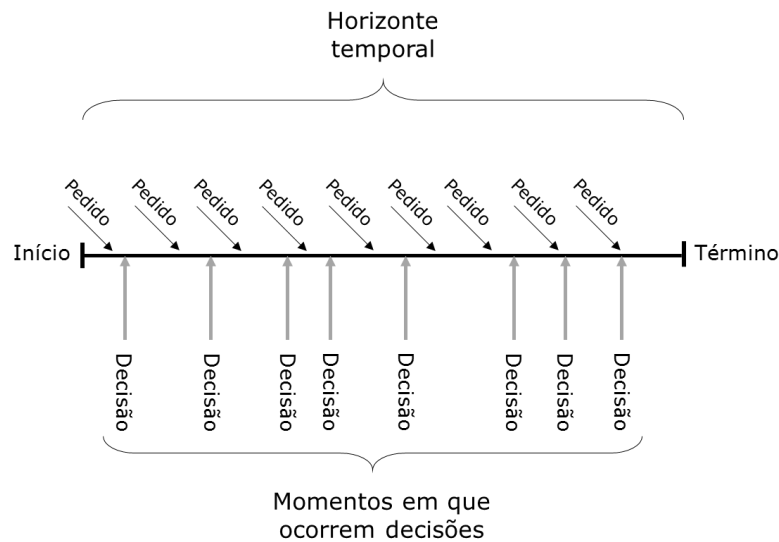


Figura 10 - Ocorrência de decisões ao longo do horizonte temporal

Neste capítulo será primeiro descrito o meta-problema. Na secção 4.2, são identificadas diferentes regras para a definição dos instantes em que irá ocorrer, ou em que se irá iniciar, cada uma das tomadas de decisão. Na terceira secção descreve-se o problema (estático) que é considerado.

4.1 O Meta-Problema

Para o meta-problema é fixado um horizonte temporal, ao longo do qual vão sendo conhecidos os pedidos de clientes. Como já referido, cada pedido é caracterizado por um local de carga, um local de descarga, uma quantidade a transportar entre ambos os locais, e janelas temporais associadas a cada um dos locais.

Nenhum dos pedidos poderá ficar afetado a mais do que um veículo, pelo que cada descarga efetuada será necessariamente realizada pelo veículo que realizou a respetiva carga. Estão atribuídos determinados tempos de serviço a cada carga ou descarga, que não poderão ser interrompidos, e cujo início terá de respeitar a janela temporal associada ao local em que ocorre essa carga ou descarga. Cada carga terá de ocorrer antes da respetiva descarga, e entre as respetivas visitas o veículo associada ao pedido irá transportar a quantidade associada ao mesmo. Nenhum dos pedidos poderá ser contemplado numa decisão anterior ao instante em que ele é colocado.

No início do horizonte temporal definido, todos os veículos estarão no armazém, e todos terão de estar no armazém no instante em que o horizonte temporal termina.

São conhecidas as distâncias entre cada dois locais, onde se inclui o armazém, ou são conhecidos os tempos necessários para percorrer cada uma dessas distâncias.

Caso, em dado momento, determinado veículo não esteja associado a nenhum pedido, ou seja, não esteja prevista para esse veículo nenhuma visita a algum local de carga ou descarga, e se esse veículo não se encontrar no armazém, então ele terá de se dirigir ao armazém, e de permanecer nesse local até que lhe seja afetado um pedido. Realça-se que o regresso pode ser interrompido, isto é, poderá ocorrer a afetação de pedidos ao veículo durante o trajeto de regresso ao armazém.

São considerados dois objetivos. Por um lado, não se impõe que sejam satisfeitos todos os pedidos, mas define-se como objetivo prioritário a maximização no número total de pedidos satisfeitos, que é equivalente à maximização da percentagem de pedidos satisfeitos. Existe um segundo objetivo que pode consistir na minimização da distância ou da duração total, associadas aos percursos.

A duração total inclui a duração de todas as deslocações realizadas, juntamente com a duração de todas as cargas ou descargas realizadas. Assim, o valor da duração total corresponderá, para cada viatura, à diferença entre o horizonte temporal e o tempo em que a viatura esteve parada no armazém.

Note-se que se está a considerar que a maximização do número de pedidos satisfeitos é o objetivo principal, isto é, caso haja duas soluções em que uma delas permite satisfazer maior número de pedidos, então essa solução será a melhor independentemente da distância, ou tempo, associada a cada uma das soluções. No caso de haver soluções com o mesmo número de pedidos satisfeitos, então a distância, ou tempo, de cada uma determinará qual delas é a melhor.

	% Pedidos Satisfeitos	Distância total
Solução 1	90%	11.000
Solução 2	80%	9.000
Solução 3	80%	10.000

Tabela 2 - Comparação de soluções

Na Tabela 2 são consideradas três soluções hipotéticas que correspondem a diferentes conjuntos de valores para a percentagem de pedidos satisfeitos e para a distância total percorrida. Face aos valores que são apresentados, a Solução 1 será considerada a melhor por ser a que permite uma maior percentagem de pedidos satisfeitos, apesar de também levar a uma distância total superior. Em relação às soluções 2 e 3, e dado que permitem satisfazer o mesmo número de pedidos, a

Solução 2 será considerada melhor por corresponder a uma distância percorrida menor.

Em alternativa à distância ou duração, poderá considerar-se como segundo objetivo a minimização de custos, que poderão ser definidos em função da duração e da distância. Para o cálculo do custo de uma solução, pode ainda ser englobado ou o número de pedidos satisfeitos, com um coeficiente negativo, ou o número de pedidos não satisfeitos, com um coeficiente positivo, ficando-se assim com uma função objetivo única. Poderão ainda ser incorporados outros fatores no cálculo do custo de uma solução associados à quantidade de carga transportada, ou ao número de veículos necessários.

4.2 Abordagem à Componente Dinâmica

Está a ser considerado que ao longo do tempo vão sendo conhecidos novos pedidos, resultando na necessidade de se proceder a alterações no planeamento. Haverá, portanto, vários momentos em que se irá tomar uma decisão que poderá, ou não, resultar em alterações. Entre cada duas decisões consecutivas será executado o planeamento definido na primeira. A informação considerada em cada decisão corresponde a um retrato do estado da frota de veículos e dos pedidos conhecidos, no instante imediatamente anterior àquele em que se inicia a respetiva tomada de decisão.

Note-se que na definição do meta-problema não ficam determinados os momentos em que se irão tomar decisões, mas é fundamental que se defina um critério que permita determinar esses momentos. Considera-se que, essencialmente, esse critério poderá estar associado com o ser atingido determinado número de pedidos novos, ou ao tempo decorrido entre decisões consecutivas.

Um primeiro critério que se poderá usar passa pela definição prévia dos instantes de decisão que, desta forma, serão independentes dos momentos em que surgem novos pedidos. Considere-se que se definia um instante para a primeira decisão, e se fixava determinado período t entre instantes de decisão, ficando assim determinados todos esses instantes. Assim, caso se tivesse tomado uma decisão num instante T , todos os pedidos recebidos após esse instante T , e não após o instante $T+t$ seriam considerados pela primeira vez na decisão tomada no instante $T+t$. A utilização deste critério é ilustrada na Figura 11.

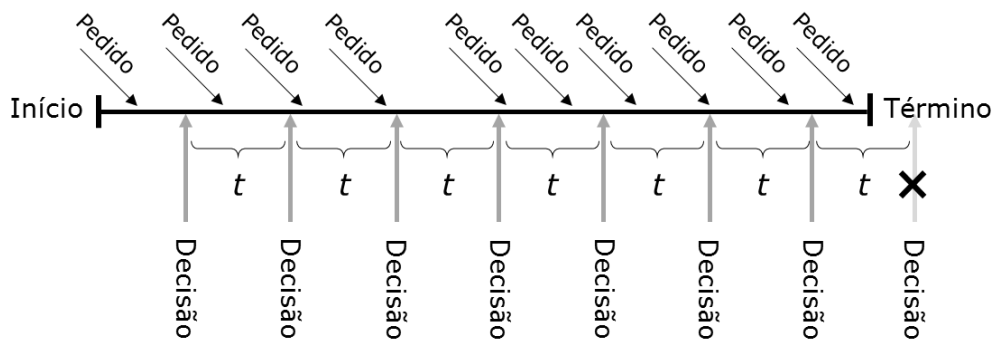


Figura 11 - Definição prévia dos instantes em que ocorrem decisões

Note-se que ao utilizar este critério pode acontecer que não sejam recebidos pedidos durante algum dos períodos definidos. Nesse cenário, e dado que não se está a considerar uma componente estocástica, se a rota definida no instante T fosse ótima, então não haveria benefício em proceder a uma nova análise no instante $T+t$, uma vez que o problema abordado em $T+t$ já se encontraria otimizado pela solução encontrada no instante T .

Por outro lado, não existindo garantias de que a solução obtida em T fosse ótima, e apesar da não existência de nova informação, poderia proceder-se a uma nova análise na expectativa de melhorar a componente do planeamento do instante $T-t$ executada após o instante T . Realça-se que o critério aqui apresentado tem a desvantagem de potenciar a exclusão de pedidos antes de ser analisada a sua afetação, o que sucederia caso tivessem surgido pedidos, entre os instante $T-t$ e o instante T , cujas janelas temporais terminassem antes do instante T .

É ainda ilustrado na Figura 11 que, caso haja pedidos colocados com pouca antecedência relativamente ao término do horizonte temporal definido, este critério não permite que eles sejam considerados. Uma forma de lidar com esta situação, seria o definir um planeamento no instante em que o horizonte temporal termina, no entanto isso não seria viável dado que nenhuma rota poderá terminar após esse instante. Uma forma de se procurar ultrapassar esta situação, seria a utilização de um critério distinto a partir da última decisão programada.

Em alternativa, o período t poderia não ser um período entre decisões, mas sim o período entre o surgimento de um primeiro pedido que ocorresse e a decisão. Portanto, entre cada duas decisões consecutivas decorreria um período, variável, não inferior a t . Esta alternativa iria garantir que entre cada duas decisões iria haver, pelo menos, um pedido novo, de acordo com a Figura 12.

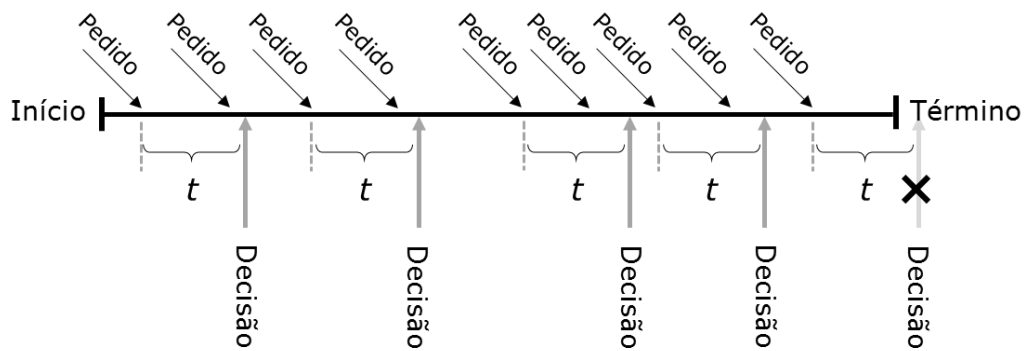


Figura 12 – Fixação de período de tempo entre instantes de recepção de pedidos e instantes em que ocorrem decisões

Continuaria presente a possibilidade de ocorrer a exclusão de pedidos antes de ser considerada a sua afetação. Inclusivamente, com este segundo critério haverá maior sujeição a essa ocorrência, dado que o critério anterior fixava um período t entre decisões consecutivas, e no segundo critério cada período decorrido será não inferior a t , podendo, portanto, ser maior o tempo decorrido entre decisões consecutivas.

Na Figura 12 também se ilustra que, à semelhança do que se tinha verificado no critério anterior, caso haja pedidos colocados com um pouca antecedência, relativamente ao término do horizonte temporal definido, este critério não permite que eles sejam considerados. Novamente, para lidar com essas ocorrências poderá aplicar-se um outro critério a partir de determinado instante, que poderá passar por reduzir o valor atribuído a t .

Um terceiro critério que aqui se contempla passa por se definir um número de pedidos recebidos, k , entre cada duas decisões. Desta forma, fica determinado que no conjunto de pedidos considerados em cada decisão estarão precisamente k pedidos que não foram considerados na decisão anterior. No entanto, continua presente a possibilidade de exclusão de pedidos provocada pelo adiamento da decisão e, como se pode verificar na Figura 13, em que se está a considerar $k=2$, também haverá benefícios em considerar alterações ao critério quando o término do horizonte temporal está mais próximo.

Na Figura 13 é considerado um cenário em que chegam mais pedidos após a última decisão efetuada, mas em número inferior a k , não se procedendo, por esse motivo, a uma nova decisão em que esses pedidos possam ser considerados.

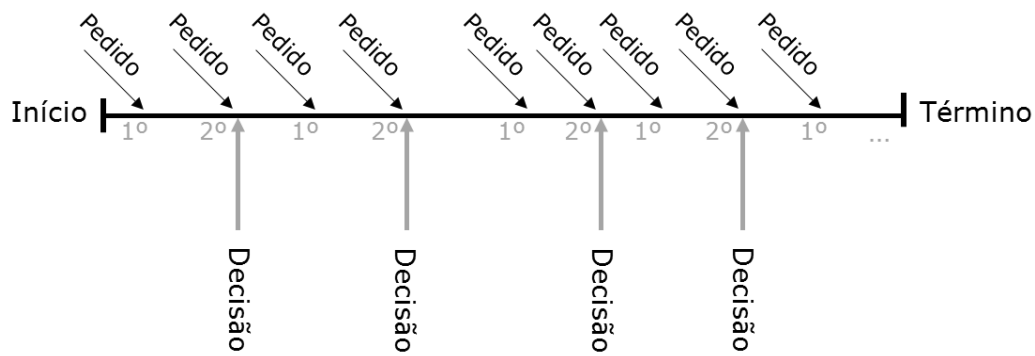


Figura 13 - Ocorrência de decisões após recepção de dois pedidos

O último critério aqui descrito, que corresponde à Figura 13, consiste na incorporação de cada pedido assim que ele seja conhecido. Esta abordagem pode ser vista como um caso particular da anterior, considerando-se $k=1$, ou como um caso particular do segundo critério apresentado, considerando-se $t=0$.

O recurso a este método permite evitar que haja pedidos excluídos devido ao tempo decorrido entre a sua colocação e a decisão. Nota-se que isto não invalida que possam surgir pedidos que seja impossível satisfazer devido à situação da frota no momento em que cada um dos pedidos surge, o que se deve à natureza dinâmica do meta-problema, e estará presente independentemente do critério usado. Fica também reduzida a possibilidade de surgirem pedidos nos instantes finais que não venham a ser analisados em nenhuma decisão. Inclusivamente, caso seja usado um dos critérios anteriores, para os quais se sugeriu uma alteração de critério a partir de determinado instante, poderá optar-se pelo critério que agora se descreve para essa abordagem final.

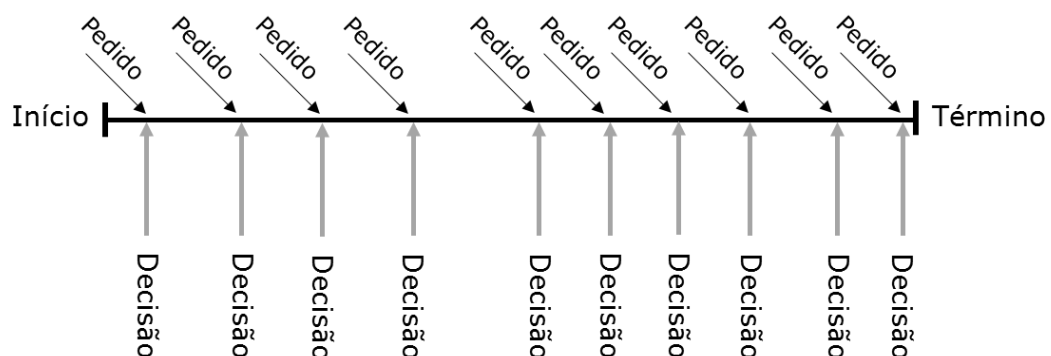


Figura 14 - Ocorrência de decisões após cada recepção de pedidos

Uma desvantagem que se poderá associar a esta opção é o número mais elevado de decisões que serão tendencialmente efetuadas ao longo do horizonte temporal

4. Definição do Problema

definido. Em situações reais, poderá ser incomportável realizar alterações ao planeamento com tanta frequência, o que invalida a aplicação deste critério.

Salienta-se ainda que se considera não ser realista assumir que é tomada uma decisão assim que cada pedido é colocado, isto é, que cada decisão será tomada de forma instantânea. Desta forma, será mais adequado admitir que irá decorrer um período de tempo entre o início da decisão, que coincide com o instante em que é extraída informação, e o momento em que se procede às alterações nas rotas decorrentes dessa decisão. Nesse sentido, poderá ser mais apropriado atribuir uma duração à decisão, como ilustrado na Figura 15, em que d corresponde à duração da decisão.

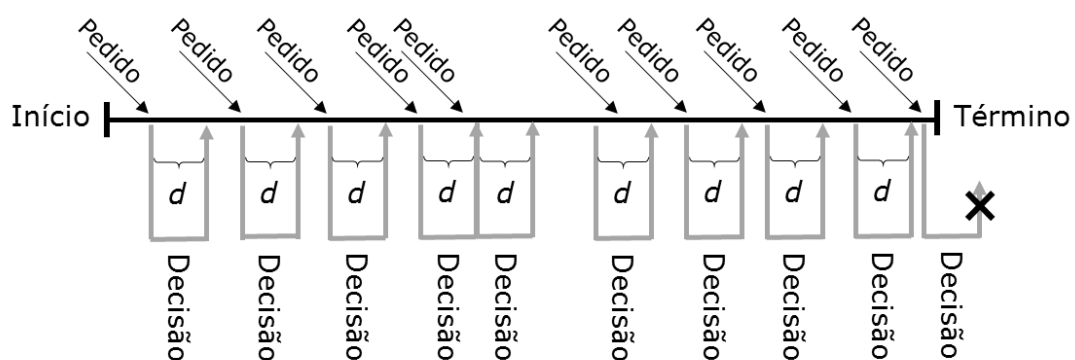


Figura 15 - Decisões com duração associada

De uma forma geral, neste cenário está a considerar-se que cada decisão é despoletada pela ocorrência de cada pedido novo, à semelhança da Figura 14, mas neste caso irão decorrer d unidades de tempo até que sejam aplicadas alterações em rotas.

Poderá suceder que no decurso da tomada de decisão surjam novos pedidos. Um pedido que surja durante uma decisão já não será considerado nessa decisão, no entanto imediatamente após ela terminar irá iniciar-se uma nova decisão que contemple esse pedido. Portanto, poderá haver decisões cujo início não corresponda ao instante em que é conhecido um pedido, o que também é ilustrado na Figura 15. Na eventualidade de surgir mais do que um pedido durante determinada decisão, na decisão imediatamente posterior irá ser considerado mais do que um pedido novo.

4.3 O Problema

Como já referido, ao longo do horizonte temporal definido irá haver momentos em que serão tomadas decisões, podendo em cada decisão ser determinadas alterações a planeamentos previamente definidos. Cada um desses momentos é uma

realização do problema que aqui se descreve, e que cuja definição resulta, em larga medida, da definição considerada para o meta-problema.

É conhecida a posição de cada um dos veículos da frota, sendo também conhecidas as respectivas capacidades disponíveis. Os veículos poderão estar parados, no armazém ou noutra local, ou poderão estar a circular. A eventualidade da capacidade disponível de um veículo não corresponder à sua capacidade total, ou seja, desse veículo estar a transportar determinada carga, irá ocorrer caso o veículo esteja a servir um ou mais pedidos.

Haverá um conjunto de pedidos conhecidos, relativamente aos quais se considera relevante distinguir dois estados possíveis. Por um lado poderá haver pedidos que já se encontrem a ser servidos por determinada viatura, ou seja, para os quais já se iniciou a carga e ainda não se terminou a descarga. Nestes casos, todas as etapas de um pedido que não tenham sido realizadas, terão que ser incorporadas na rota da viatura que iniciou respetiva carga. Poderá também haver pedidos por servir, para os quais ainda não se iniciou a respetiva carga. Aqui, não ficam explicitamente impostas restrições sobre que veículo os poderá satisfazer, podendo, inclusivamente, optar-se por não se satisfazer um ou mais pedidos nessa situação.

Caso um veículo esteja a realizar uma carga ou uma descarga, ela não poderá ser interrompida, conforme se indicou na definição do meta-problema. Se o veículo estiver num local de carga ou descarga, e o respetivo serviço ainda não se tenha iniciado, ou já tenha terminado, ou se o veículo estiver no armazém, então poderá dirigir-se imediatamente para qualquer outro local, assumindo não ficam comprometidas outras restrições.

Poderá também haver pedidos que já foram integralmente satisfeitos, e pedidos que, não tendo sido satisfeitos, já não poderão ser servidos dentro das respetivas janelas temporais. Nestes casos, poderia admitir-se que existem outros estados associados aos pedidos. No entanto, é aqui considerado que estes pedidos são excluídos do problema, uma vez que eles não poderão ser incorporados nas rotas que se estão a definir.

Em termos de objetivo, o que se considera fundamental é que em cada realização do problema se contribua para se atingir o objetivo que estiver a ser considerado para o meta-problema. No entanto, uma vez que a informação é conhecida de uma forma progressiva, não é possível avaliar essas contribuições de forma precisa.

Assim, surge a necessidade de definir objetivos que possam permitir uma análise de cada rota que possa vir a ser considerada na realização de um problema, e que se considere que estejam enquadrados no objetivo global. A abordagem mais

4. Definição do Problema

imediate consistiria em considerar o mesmo objetivo que fosse considerado para o meta-problema, mas restrito à informação disponível no problema.

Face à presença da componente dinâmica, pretende-se contemplar a possibilidade de se poder recorrer a métodos que procurem antecipar possíveis pedidos que possam vir a surgir em momentos futuros. Assim, é também considerada a existência de um conjunto de informações que permitam de alguma forma prever que pedidos poderão surgir no futuro, e que características poderão ter. Desta forma, poderão ser definidos objetivos em que se incorpora a adequação de cada solução ao futuro, potenciando o recurso a objetivos associados ao problema que contribuam mais eficazmente para os objetivos do meta-problema.

5. Formulação

Neste capítulo é apresentada uma formulação matemática para o problema estático descrito no Capítulo 4. A partir desta formulação e com recurso ao *software* Xpress 7.7, obtiveram-se soluções ótimas para algumas das instâncias consideradas.

Referiu-se na descrição do problema que existe um objetivo primário que consiste na maximização do número de pedidos satisfeitos, e um objetivo secundário que poderá consistir na minimização da distância, tempo ou custo, sendo considerada a minimização da distância no presente trabalho. De forma a considerar os dois objetivos em simultâneo, poderia ter sido construída uma função objetivo que contemplasse ambos, que poderia consistir no número de pedidos satisfeitos subtraído do produto da distância total por um coeficiente. Esse coeficiente teria de ser positivo não nulo, não se pretendendo que o seu produto com a distância total pudesse ser superior a 1.

Em alternativa a uma função objetivo a incorporar o número de pedidos e a distância total, optou-se por se fixar previamente o número de pedidos que ficariam por satisfazer, o que equivale a fixar o número de pedidos a satisfazer, dado que será conhecido o número total de pedidos. Assim, na função objetivo apenas é contemplada a distância total percorrida. Adicionalmente, na formulação apresentada o problema é aberto, o que faz com que os regressos ao armazém não sejam

considerados para o cálculo da distância. Desta forma, ao usar a formulação para se obter o método exato para o problema apresentado, foi acrescentado a cada rota um local de visita obrigatório com as características do armazém, e com janelas temporais superiores às dos restantes locais considerados, para que essa fosse a última visita de cada rota.

Esta opção tem como desvantagem criar a necessidade de se aplicar o algoritmo exato várias vezes para se obter o número de pedidos satisfeitos ótimo. No entanto, uma vez que com a implementação do método exato se pretende avaliar soluções obtidas através de heurísticas, e sendo expectável que nessas soluções possa estar a ser satisfeito um número de pedidos inferior ao ótimo, a possibilidade de minimizar a distância total percorrida para um número de pedidos satisfeitos fixos permite avaliar o desempenho de qualquer solução obtida através de heurísticas em termos de distância percorrida, independentemente de se atingir ou não um valor ótimo relativamente ao objetivo principal.

Considere-se então um grafo completo $G = (V, A)$, com um conjunto de vértices $V = \{1, \dots, N+1\}$, e em que A é o conjunto de arcos. O vértice $N+1$ corresponde ao armazém. Encontram-se disponíveis K veículos, todos eles com capacidade C , sendo conhecidas as suas posições num instante inicial, que correspondem ao conjunto de vértices $O^+ = \{1, \dots, K\}$. Os restantes vértices correspondem a locais de carga e a locais de descarga, havendo um conjunto de M locais de descarga que se referem a pedidos cuja carga já se iniciou, $O^- = \{K+1, \dots, K+M\}$, devendo cada um desses locais de descarga ser obrigatoriamente visitado pelo mesmo veículo que iniciou a respetiva carga.

Os restantes vértices correspondem aos locais de carga e de descarga de R pedidos integralmente por satisfazer, tendo-se $2R = N - K - M$. Considere-se ainda o conjunto de todos os locais de carga (ou *pickup*), dado por $P^+ = \{K+M+1, K+M+3, \dots, K+M+2R-1\}$, e o conjunto de todos os locais de descarga (ou *delivery*), dado por $P^- = \{K+M+2, K+M+4, \dots, K+M+2R\}$, verificando-se que i é um local de carga, $i \in P^+$, se e só se $i+1$ for um local de descarga, $i+1 \in P^-$, correspondendo ambos ao mesmo pedido.

Note-se que os conjuntos O^+ , O^- , P^+ , P^- e $\{N+1\}$ são uma partição de V . Considere-se ainda o conjunto de todos os locais que terão obrigatoriamente de ser visitados, em que se incluem as posições atuais e as descargas de pedidos parcialmente satisfeitos, $O = O^+ \cup O^-$, o conjunto de todas as cargas e todas as descargas de pedidos integralmente por satisfazer, $P = P^+ \cup P^-$, cujas visitas são opcionais, e o conjunto de todos os locais exceto o armazém, $V' = V \setminus \{N+1\} = O \cup P$.

A cada arco $(i,j) \in A$ está associado um custo não negativo, c_{ij} , em que se têm custos simétricos, $c_{ij} = c_{ji}$, $\forall i \in V'$. Estes valores estão a ser simultaneamente considerados como distâncias e como tempos associados ao percorrer cada uma dessas distâncias. Não sendo pretendido que se usem laços, considere-se $c_{ii} = c_{i(N+1)} = +\infty$, $\forall i \in V$.

A cada vértice $i \in V$ está também associada uma variação de carga, q_i . No instante inicial, cada veículo poderá ter associada uma carga não nula. Ter-se-á, necessariamente, $q_{N+1} = 0$, ou seja, a variação de carga é nula no armazém, e também $q_j = -q_{j+1} > 0$, $\forall j \in P^+$, isto é, o valor da variação em cada local de carga será o simétrico da variação no respetivo local de descarga, sendo a primeira positiva. No caso dos locais de descarga obrigatórios, que também terão variações de carga negativas, será necessariamente verificado que, fixado um veículo, a soma das variações nos locais de descarga que esse veículo terá de visitar, corresponderão ao simétrico da carga associada à posição inicial desse veículo.

Para cada vértice $i \in V$, existe uma janela temporal $[e_i, l_i]$, com $e_i \leq l_i$, dentro da qual terá de ocorrer uma eventual visita a esse local. No caso de cada uma das posições iniciais, $j \in O^+$, tem-se $e_j = l_j = 0$. Na janela temporal associada ao armazém são usados valores que garantam que a visita ao armazém ocorre após qualquer outra, sem que se esteja a limitar implicitamente alguma das restantes janelas temporais. Nesse sentido, uma alternativa que se poderá considerar para definir a janela temporal do armazém, é definir $e_{N+1} = l_{N+1} = \max\{l_j + c_{j(N+1)}, \forall j \in V'\}$.

Para cada um dos locais distintos do armazém, $i \in V'$ e para cada veículo $j \in O^+$ está associada uma variável de decisão a_{ij} que toma o valor 1 caso o local B seja visitado pelo veículo j , e 0 caso contrário. Para cada um dos locais obrigatórios $i \in O$, $\exists j \in O^+$ tal que $a_{ij} = 1$, e se $\forall i \in O^+$, então $a_{ii} = 1$, ou seja, a i -ésima posição inicial corresponde ao i -ésimo veículo. Para cada um dos locais de carga e descarga de pedidos integralmente por satisfazer, $i \in P$, tem-se que a_{ij} , será uma variável de decisão, para qualquer $j \in O^+$.

Associada a cada vértice $i \in V$, é considerada uma variável, Q_i , que indica a quantidade carregada pelo veículo que visita o local i imediatamente após sair desse local (ou imediatamente após terminar a carga ou descarga efetuada nesse local). No caso particular do armazém, uma vez que não ocorrem saídas desse local, mas considerando também que todos os veículos o irão visitar, pode considerar-se que Q_{N+1} indica a soma das quantidades carregadas por todos os veículos quando terminam as respetivas rotas, valor que deverá ser nulo. Considera-se também um conjunto de variáveis de decisão na forma B_i , com $i \in V'$, que indicará a distância já

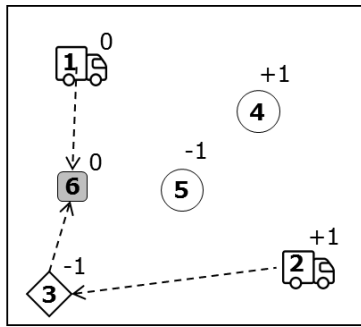
percorrida pelo veículo que visita i , no instante em que esse veículo visita i . Caso i não seja visitado, então B_i será nulo.

Enquanto determinado veículo estiver a percorrer uma distância, a distância e o tempo variam da mesma forma. No entanto, quando o veículo estiver parado apenas o tempo irá variar. Salientando que ambos os valores são relevantes, o primeiro por ser considerado na função objetivo, e o segundo por estarem envolvidas janelas temporais, introduzem-se as variáveis de decisão E_i , com $i \in V'$ que indicam o tempo de paragem acumulado pelo veículo que visita i até ao instante em que essa visita ocorre. A soma de cada um dos valores E_i , com o respetivo valor B_i , corresponde efetivamente ao instante em que determinado veículo visitou o local $i \in V'$.

Ainda relativamente a variáveis de decisão, é usada uma matriz de precedências, em que cada valor x_{ij} , com $i, j \in V$, toma o valor 1 caso o vértice i seja visitado antes do vértice j , e ambas as visitas sejam efetuadas pelo mesmo veículo, e toma o valor 0 caso os vértices não sejam visitados pelo mesmo veículo ou se, sendo visitados pelo mesmo veículo, a visita ao vértice i não ocorre antes da visita ao vértice j . No caso particular em que um dos locais é o armazém, tem-se $x_{(N+1)j} = 0, \forall i \in V$, e tem-se que $x_{i(N+1)} = 1$, para todos os locais i que sejam visitados por algum dos veículos. Tem-se que cada local irá preceder ao armazém se e só se ele for visitado por algum dos veículos.

Foi referido que se fixa um número de pedidos que ficarão por satisfazer, N_{PNS} . Também se considera o número de locais a visitar, que se pode obter a partir do número de pedidos por satisfazer, $N_{LV} = N - 2 * N_{PNS}$. Relativamente à função objetivo considerada, é usado um conjunto de variáveis na forma $B'_k, k \in O^+$, cujos valores irão corresponder à distância total percorrida por cada um dos veículos disponíveis, querendo-se minimizar a soma desses valores.

Antes de se apresentar a formulação, são usados exemplos para se ilustrar o que algumas das variáveis representam. Na Figura 16 é apresentada uma instância em que existem dois veículos. O veículo 1 encontra-se no local 1, não tem visitas previstas, e está a regressar ao armazém. Para o veículo 2, que está no local 2, está prevista a visita o local 3 antes do regresso ao armazém. Os locais 4 e 5 correspondem, respetivamente, ao local de carga e local de descarga de um pedido novo. Por uma questão de simplicidade, não são contempladas janelas temporais. Considera-se que as quantidades associadas aos pedidos são unitárias, e que cada veículo tem capacidade 2.



Conjuntos de Locais

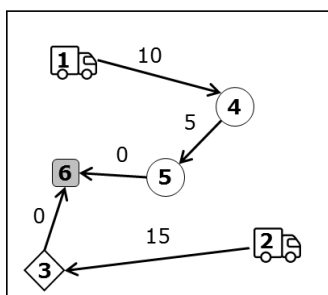
- Posições Iniciais: $O^+ = \{1,2\}$
- Visitas Obrigatórias: $O^- = \{3\}$
- Locais de Carga: $P^+ = \{4\}$
- Locais de Descarga: $P^- = \{5\}$

- Legenda :
- > Rota prevista
 - ◻ Visita obrigatória
 - Posição inicial
 - Carga/Descarga de Pedido Novo
 - Armazém

Figura 16 - Exemplo de uma instância

Na imagem da Figura 16 indica-se a variação de carga em cada local. O veículo 1 está vazio, e o veículo 2 carrega uma unidade, valores que ficam associados aos locais 1 e 2, respetivamente. O veículo 2 terá de descarregar uma unidade no local 3. No local 4 será carregada uma unidade, que será descarregada no local 5.

Considere-se que é pretendido satisfazer o pedido novo, ou seja, que $N_{PNS} = 0$. Na Figura 17 é descrita uma solução, em que o pedido é satisfeito pelo veículo 1. Na imagem são ilustradas ambas as rotas, e são indicadas distâncias dos trajetos usados. Note-se que nos trajetos para o armazém as distâncias são nulas, dado que a formulação é para um problema aberto.



Distâncias Acumuladas

Locais	Rotas
$B_1 = 0$	$B'_1 = 15$
$B_2 = 0$	$B'_2 = 15$
$B_3 = 15$	
$B_4 = 10$	
$B_5 = 15$	

Quantidades

$Q_1 = 0$
$Q_2 = 1$
$Q_3 = 0$
$Q_4 = 1$
$Q_5 = 0$

Matriz de Precedências

		Locais					
		1	2	3	4	5	6
Locais	1	0	0	0	1	1	1
	2	0	0	1	0	0	1
	3	0	0	0	0	0	1
	4	0	0	0	0	1	1
	5	0	0	0	0	0	1
	6	0	0	0	0	0	0

Matriz de Afetações

		Locais (exceto armazém)				
		1	2	3	4	5
Veículos	1	1	0	0	1	1
	2	0	1	1	0	0

- Legenda :
- Rota executada
 - ◻ Visita obrigatória
 - Posição inicial
 - Local de Pedido Novo
 - Armazém

Figura 17 - Exemplo de uma solução

5. Formulação

Na Figura 17 são indicados valores para as variáveis que registam distâncias acumuladas, para as variáveis que registam quantidades em cada local, e para as matrizes de precedências e de afetações. Para o veículo 1, a ordem de visitas é 1-4-5-6. Assim, o local 1 precede os locais 4,5 e 6, o local 4 precede os locais 5 e 6, e o local 5 precede o local 6, como representado na matriz de precedências. Na matriz de afetações fica indicado que os locais 1, 4 e 6 são satisfeitos pelo veículo 1. Para a rota do veículo 2, dada por 2-3-6, a matriz de precedências reflete que o local 2 é visitado antes dos locais 3 e 6, e o local 3 é visitado antes do local 6, enquanto a matriz de afetações indica que o veículo 2 visita os locais 2 e 3.

O veículo 1 está vazio no instante inicial e no local 4 irá carregar uma unidade, que depois descarrega no local 5, ficando novamente vazio. O veículo 2 transporta uma unidade de carga no instante inicial, que depois descarrega no local 3 de onde irá sair vazio.

Em relação a distâncias acumuladas, para os locais 1 e 2 o valor é nulo por se tratarem das posições iniciais dos veículos. O veículo 1 terá percorrido dez unidades quando visitar o local 4, e até ao local 5 terá percorrido 15 unidades. O veículo 2 percorre 15 unidades até ao local 3. A distância total percorrida por cada veículo é de 15 unidades, que corresponde à maior distância acumulada registada nas respetivas visitas. Assim, a solução apresentada tem valor 30.

No Capítulo 8 são apresentadas soluções ótimas, para as quais se recorreu a esta formulação. Como referido, sendo esta formulação para um problema aberto, são inseridos locais de visita obrigatória cujas coordenadas correspondem às do armazém. Na Figura 18 ilustra-se a introdução desses armazéns "fictícios", e os

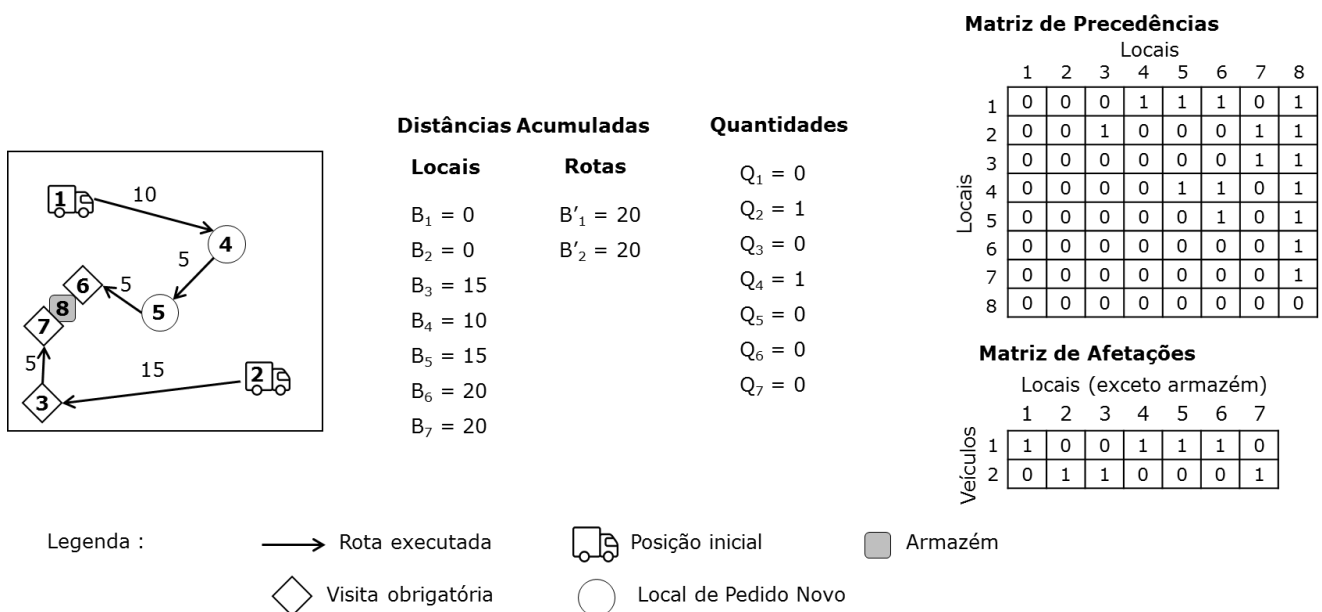


Figura 18 – Exemplo com introdução de armazéns "fictícios"

valores que passam a ficar associados ao conjunto de variáveis de decisão. Ao ser contabilizado o regresso ao armazém, cada rota passa a corresponder a 20 unidades de distância, levando a que a solução tenha valor 40.

Ao longo da formulação, apresentada em seguida, são as restrições apresentadas.

$$\min \sum_{k \in O^+} B'_k$$

Sujeito a

Precedências e Afetações	$B'_k \geq B_i - l_i * (1 - a_{ik})$	$\forall i \in V'$	$\forall k \in O^+$	(1)			
	$x_{i(N+1)} - \sum_{k \in O^+} a_{ik} = 0$			$\forall i \in V'$	(2)		
	$\sum_{k \in V}(x_{ik} + x_{ki}) - \sum_{k \in V}(x_{jk} + x_{kj}) \leq (1 - (x_{ij} + x_{ji})) * N_{LV}$				$\forall i, j \in V', i \neq j$	(3)	
	$x_{ij} + x_{ji} \geq a_{ik} + a_{jk} - 1$				$\forall i, j \in V', i \neq j$	$\forall k \in O^+$	(4)
	$x_{ij} + x_{ji} \leq a_{ik} - a_{jk} + 1$				$\forall i, j \in V', i \neq j$	$\forall k \in O^+$	(5)
	$x_{ij} + x_{ji} \leq \sum_{k \in V} a_{ik}$				$\forall i, j \in V', i \neq j$		(6)
	$x_{ij} - x_{ik} \leq 1 - x_{jk}$				$\forall i, j \in V', k \in V$	$i \neq j, i \neq k, j \neq k$	(7)

- (1) A distância percorrida por cada veículo corresponde à maior das distâncias acumuladas associadas aos locais visitados por esse veículo. Caso fosse colocada uma restrição $B'_k \geq B_i$, a distância percorrida por cada veículo teria que ser não inferior a qualquer uma das distâncias acumuladas, incluindo as associadas a locais não visitados por esse veículo. Ao subtrair $l_i * (1 - a_{ik})$ ao membro do lado direito, nos locais visitados por determinado veículo k , tem-se $a_{ik} = 1$, e o valor subtraído é nulo, enquanto que para os locais não visitados por esse veículo k , em que se terá $a_{ik} = 0$, obtém-se $B_i - l_i$, que será não positivo, dado que $l_i \geq B_i$.
- (2) Esta restrição indica que um local $i \in V'$ é visitado antes do armazém se e só se ele for visitado por algum veículo
- (3) Tem-se que, para cada par de locais $i, j \in V'$, se eles forem visitados pelo mesmo veículo, então ou i precede j , $x_{ij} = 1$ (com $x_{ji} = 0$), ou j precede i , $x_{ji} = 1$ (com $x_{ij} = 0$). Caso contrário, isto é, se os locais são visitados por veículos distintos ou se pelo menos um deles não é visitado por nenhum veículo, tem-se $x_{ij} = x_{ji} = 0$. Assim, o valor de $\sum_{k \in V}(x_{ik} + x_{ki}) - \sum_{k \in V}(x_{jk} + x_{kj})$ corresponde à diferença entre o número de locais visitados

pelo mesmo veículo que visita i , com a exceção de i , e o número de locais visitados pelo mesmo veículo que visita j , com exceção de j . Caso i e j sejam visitados pelo mesmo veículo, essa diferença deverá ser nula, o que será garantido pelo membro direito $(1 - (x_{ij} + x_{ji})) * N_{LV}$, uma vez que, nesse caso, $x_{ij} + x_{ji} = 1$. Se esses dois locais não forem visitados pelo mesmo veículo, tem-se $x_{ij} + x_{ji} = 0$, pelo que a diferença será não superior ao número de locais a visitar, N_{LV} . Com a exceção de um cenário em que haja um único veículo e em que se pretenda visitar todos os locais ($N_{PNS} = 0$ e $N_{LV} = N$), haverá necessariamente algum par de locais não visitados pelo mesmo veículo. Caso i seja visitado por algum veículo, e j seja visitado por outro veículo, ou não seja visitado, esta restrição reduz-se a $\sum_{k \in V} (x_{ik} + x_{ki}) \leq N_{LV}$, sendo imposto que o número de locais associados a cada veículo seja não superior ao número total de locais a visitar.

- (4) Com esta restrição fica imposto que caso dois locais distintos $i, j \in V'$ sejam visitados pelo mesmo veículo $k \in O^+$, pelo menos um desses locais tem de preceder ao outro. Simultaneamente, se nenhum dos locais precede o outro, então eles não poderão pertencer ao mesmo veículo.
- (5) Aqui impõe-se que se dois locais distintos forem visitados pelo mesmo veículo, então eles não poderão preceder-se um ao outro simultaneamente. Juntamente com a restrição anterior, fica determinado se dois locais estão associados ao mesmo veículo, então haverá um e só um deles a preceder a outro. Ao percorrer todos os pares ordenados de locais distintos, fica também imposto que para cada par de locais que não estejam associados ao mesmo veículo, nenhum deles poderá preceder ao outro.
- (6) Se determinado local $i \in V'$ não for visitado por nenhum dos veículos, então ele não precede a nenhum local, nem é precedido por nenhum local.
- (7) Dados três locais $i, j \in V'$, $k \in V$, distintos, se é verificado que i precede a j e que j precede a k , então ter-se-á que i precede a k .

Pedidos	$a_{ik} = a_{(i+1)k}$	$\forall i \in P^+$ $\forall k \in O^+$	(8)
	$x_{ij} \geq x_{(i+1)j}$	$\forall i \in P^+$ $\forall j \in V$	(9)
	$x_{ji} \leq x_{j(i+1)}$	$\forall i \in P^+$ $\forall j \in V'$	(10)
	$\sum_{i \in V'} \sum_{k \in O^+} a_{ik} = N_{LV}$		(11)

- (8) Para cada local de carga $i \in P^+$, e cada veículo $k \in O^+$, o local i é visitado pelo veículo k , se e só se o local de descarga $i+1 \in P^-$, que corresponde ao mesmo pedido que o local i , também for visitado pelo veículo k .
- (9) Se um local de descarga $i+1 \in P^-$ precede a um local $j \in V$, então o local $i \in P^+$ também precede ao local j .
- (10) Se um local de carga $i \in P^+$ é precedido por um local $j \in V'$, então o local $i+1 \in P^-$ também é precedido pelo local j .
- (11) A soma dos valores das variáveis que registam a afetação de locais a veículos é igual ao número de locais a visitar.

$$\begin{array}{l} \text{Cargas} \\ \left| \begin{array}{l} Q_i = q_j * \sum_{j \in L} x_{ji} + q_i * \sum_{k \in V} a_{ik} \\ Q_{N+1} = 0 \end{array} \right. \end{array} \quad \begin{array}{l} \forall i \in V \\ \\ \end{array} \quad \begin{array}{l} (12) \\ (13) \end{array}$$

- (12) A quantidade carregada associada a um local $i \in V$ corresponde à soma das variações de carga de todos os locais $j \in V'$ que precedem i , acrescida da variação de carga do local i . Quando se tratam de posições iniciais, $i \in O^+$, não existem visitas anteriores, pelo que se terá $Q_i = q_i$. Caso se tenha $i \in P$, não visitado por nenhum veículo, então obtém-se $Q_i = 0$.
- (13) No caso particular do armazém, é imposto que $Q_{N+1} = 0$.

$$\begin{array}{l} \text{Esperas} \\ \left| \begin{array}{l} B_j \geq B_i + c_{ij} * x_{ij} - l_i * (1 - x_{ij}) \\ E_j \geq E_i - (l_i + T_i) * (1 - x_{ij}) \end{array} \right. \end{array} \quad \begin{array}{l} \forall i, j \in L, i \neq j \\ \forall i, j \in L, i \neq j \end{array} \quad \begin{array}{l} (14) \\ (15) \end{array}$$

- (14) Dados dois locais $i, j \in V$, se eles são visitados pelo mesmo veículo, e a visita a i precede a visita a j , isto é, se $x_{ij} = 1$, então a distância acumulada associada a j será não inferior à soma da distância acumulada associada a i com a distância entre esses locais, c_{ij} .
- (15) Dados dois locais $i, j \in V$, se eles são visitados pelo mesmo veículo, e a visita a i precede a visita a j , isto é, se $x_{ij} = 1$, então a espera acumulada associada a j será não inferior à espera acumulada associada a i .

Integridade	$x_{ij} \in \{0,1\}$	$\forall i \in V',$	(16)
		$\forall j \in V, i \neq j$	
	$x_{ii} = 0$	$\forall i \in V'$	(17)
	$a_{ik} \in \{0,1\}$	$\forall i \in V',$	(18)
		$\forall k \in O^+$	
	$0 \leq Q_i \leq C * \sum_{k \in O^+} a_{ik}$	$\forall i \in V$	(19)
	$0 \leq B_i \leq l_i * \sum_{k \in V} a_{ik}$	$\forall i \in L$	(20)
$B_i + E_i \leq l_i * \sum_{k \in V} a_{ik}$	$\forall i \in L$	(21)	
$0 \leq E_i \leq e_i * \sum_{k \in V} a_{ik}$	$\forall i \in L, \forall k \in V$	(22)	

- (16) As variáveis de decisão da matriz de precedências são binárias.
- (17) Nenhum local se precede a ele próprio.
- (18) As variáveis de decisão que indicam afetação de locais a veículos são binárias.
- (19) A quantidade carregada associada a um local $i \in V$ será não negativa, não podendo ser superior à capacidade dos veículos, C , caso o local seja visitado por algum veículo, e sendo nula, caso o local não seja visitado.
- (20) A distância acumulada associada a um local $i \in V$ será não negativa, sendo não superior ao limite superior da janela temporal desse local, l_i , caso o local seja visitado por algum veículo, e sendo nula, caso o local não seja visitado.
- (21) Para cada local $i \in V$, a soma dos valores acumulados de tempo sem espera e de espera, associados a esse local i , serão não superiores ao limite superior da respetiva janela temporal.
- (22) Para cada local $i \in V$, o tempo de espera acumulado associado a esse local i , será não negativo e não superior ao limite inferior da respetiva janela temporal.

6. Instâncias

Uma vez definido o problema, foi necessária a obtenção de instâncias para a execução dos algoritmos. Nesse conjunto de instâncias pretendia-se considerar características variadas, no sentido de permitir a análise do desempenho dos vários algoritmos em cenários distintos, tendo-se optado pela construção de um gerador de instâncias, implementado em MATLAB.

Na secção 6.1 são descritos parâmetros considerados na geração de instâncias. Antes, importa referir que se optou por uma correspondência direta entre unidades de tempo e unidades de distância. Mais propriamente, se a distância entre dois locais for de 100 unidades, também irá acontecer que se demoram 100 unidades de tempo ao percorrer essa distância. Acrescenta-se que se está a considerar o minuto como unidade de tempo, o que serviu como referência e motivou algumas das opções que serão a seguir descritas.

Na secção 6.2 é caracterizada cada uma das instâncias (dinâmicas) consideradas para obtenção dos resultados apresentados no Capítulo 8.

6.1 Gerador de Instâncias

Definiu-se que alguns dos parâmetros teriam valores previamente fixados pelo gerador de instâncias, noutros o utilizador pode optar entre alternativas específicas,

enquanto outros teriam associadas distribuições de probabilidade, ficando ao critério do utilizador parametrizar cada uma dessas distribuições, a partir de um conjunto de opções apresentadas pelo gerador de instâncias. No entanto, em várias das instâncias que vieram a ser utilizadas considerou-se adequado recorrer valores diferentes dos atribuídos ou disponibilizados pelo gerador de instâncias, no caso dos valores fixos, ou utilizar valores específicos, em alternativa ao recurso a distribuições de probabilidades.

Passa-se a descrever os diferentes fatores que são considerados no gerador de instâncias, sendo, em cada um deles, indicado o valor atribuído por defeito ou as alternativas apresentadas pelo gerador de instâncias, conforme aplicável.

6.1.1 Horizonte Temporal

O horizonte temporal corresponde ao tempo que decorre desde o instante inicial, em que ainda não se conhecem pedidos e em que todos os veículos se encontram na sede, e o instante final, em que já não irão ocorrer novos pedidos e no qual todos os veículos deverão estar de regresso à sede.

Em algumas das instâncias consideradas atribuiu-se a esta variável o valor 10080 (unidades de tempo) que, usando como referência o minuto, corresponde a uma semana, sendo esse o valor atribuído fixado por defeito pelo gerador instâncias.

Pretendia-se considerar um horizonte temporal correspondente a duas ou quatro semanas, no entanto isso levava a tempos de execução muito elevados quando se recorria ao Algoritmo Genético.

Como será abordado na secção 6.2, em várias das instâncias foi considerado um horizonte temporal de 36000 unidades de tempo, mas apenas se executam os vários algoritmos em parte das decisões.

6.1.2 Dimensão da Região

Este fator determina limites para as coordenadas associadas a qualquer local considerado, que poderá ser um local de carga, um local de descarga, ou a sede. As coordenadas de cada local serão um par de valores inteiros positivos, em que não se excedam as dimensões consideradas para a região.

Foram introduzidas duas alternativas, sendo a primeira a utilização de uma região quadrangular com 1000 por 1000 unidade de distância, podendo, em alternativa, optar-se por uma região retangular com 800 por 1200 unidades de distância. Apesar do gerador de instâncias permitir estas duas alternativas, em todas as instâncias geradas foi considerada a região retangular.

Faz-se notar que, considerando o minuto como unidade de tempo, em ambas as opções descritas para a região sucede que o tempo necessário para ir de um local para outro será, no máximo, de aproximadamente um dia.

6.1.3 Duração do Processo de Decisão

Considera-se que cada decisão não é instantânea, isto é, que irá decorrer determinado período entre o início de um processo de decisão e o início da execução do planeamento que daí resulte, de acordo com o que se ilustrou na Figura 15, no Capítulo 4. Optou-se por fixar este período em dez unidades de tempo.

6.1.4 Localização da Sede

Como se referiu, todos os locais, incluindo a sede, terão as suas coordenadas limitadas pela região definida. Considerou-se, no entanto, que poderia ser relevante considerar diferentes posicionamentos para a sede. Assim, poderá optar-se por ter a sede localizada ou no centro geométrico da região, ou num dos vértices do polígono considerado. Mais propriamente, caso se opte por um vértice a sede terá como coordenadas (1,1) e, ao optar-se pelo centro geométrico, as coordenadas serão de (500,500) para uma região quadrangular, e de (400,600) para uma região retangular.

6.1.5 Número de veículos

Em alternativa a optar-se por um número de veículos específico, o gerador permite selecionar um intervalo para esse valor. Assim, poderá optar-se entre um número de veículos entre cinco e dez, ou entre 15 e 20. O número de veículos a considerar será obtido através de uma distribuição uniforme associada ao intervalo escolhido.

Apesar de na construção do gerador se ter excluído a definição de um valor específico, veio a ser definido um valor para o número de veículos nas várias instâncias que foram consideradas.

6.1.6 Capacidade dos Veículos

Definiu-se que a frota seria homogénea, tendo sido fixada a capacidade dos veículos em 33 unidades de carga. Aqui, foi tido em consideração que os semi-reboques têm habitualmente capacidade para 33 europaletes. Em algumas das instâncias foi considerada uma capacidade de apenas três unidades de carga.

6.1.7 Distribuição dos locais

6. Instâncias

Para definir as coordenadas dos locais de carga e dos locais de descarga dos vários pedidos recorre-se a duas distribuições multinomiais. Assim, para cada par de coordenadas possível para a região definida, ficará atribuída uma probabilidade de um local de carga ter essas coordenadas, e uma probabilidade de um local de descarga ter essas coordenadas. Na Figura 19 é representada uma região de 800 por 1200 unidades de distância, com probabilidades associadas a cada par de coordenadas.

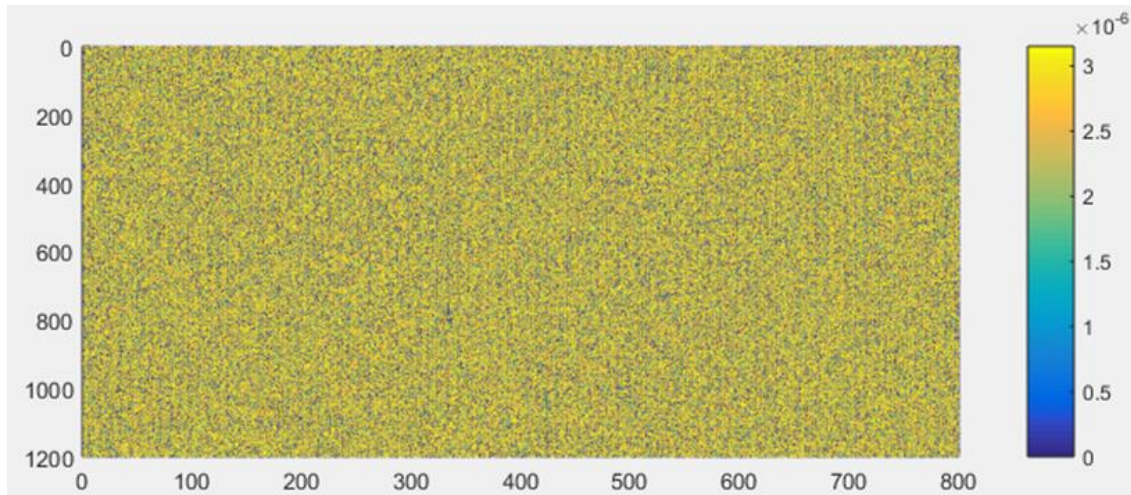


Figura 19 – Distribuição de probabilidades associadas a locais, sem zonas de concentração de probabilidades mais elevadas

Procurando permitir uma maior aproximação a um cenário real, considerou-se que seria relevante simular a existência de zonas industriais ou comerciais, em que se verificam probabilidades mais elevadas. Nesse sentido, incorporou-se a possibilidade de definir conjuntos aproximadamente circulares cujos pontos irão corresponder a probabilidades mais elevadas. Como se pode verificar pela Figura 20,

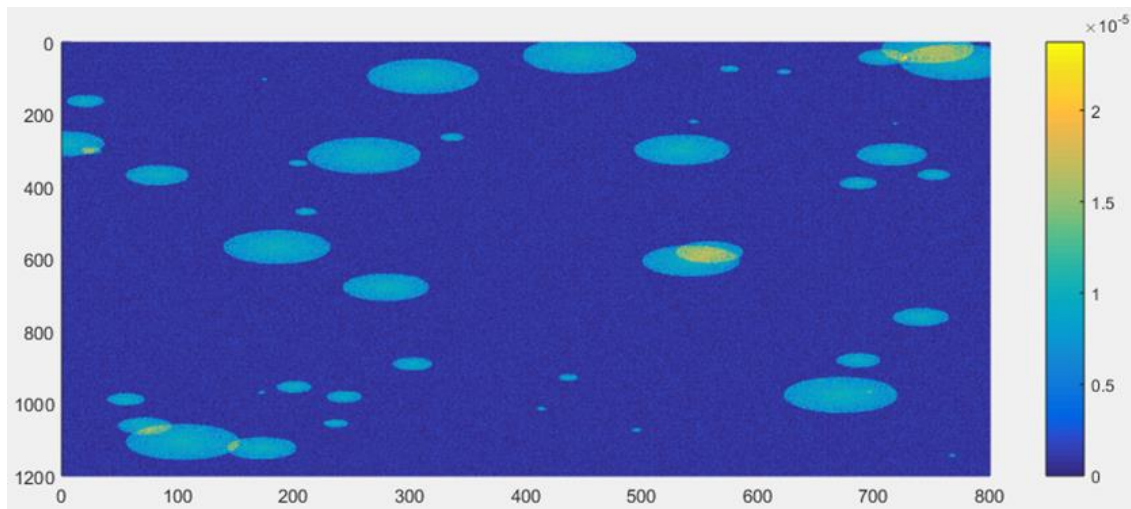


Figura 20 – Distribuição de probabilidades associadas a locais, com zonas de concentração de probabilidades mais elevadas

essas zonas podem ter raios distintos, e permite-se que possam ocorrer sobreposições.

Pode optar-se por não recorrer à definição de zonas de concentração, o que corresponde à Figura 19, havendo atribuição de probabilidades a cada local de forma aleatória (com recurso a uma distribuição uniforme). Caso se pretenda, pode optar-se pelo recurso a zonas de concentração, havendo duas alternativas, sendo que numa delas existe maior disparidade entre as probabilidades verificadas nas zonas de concentração e as restantes, como ilustrado na Figura 21.

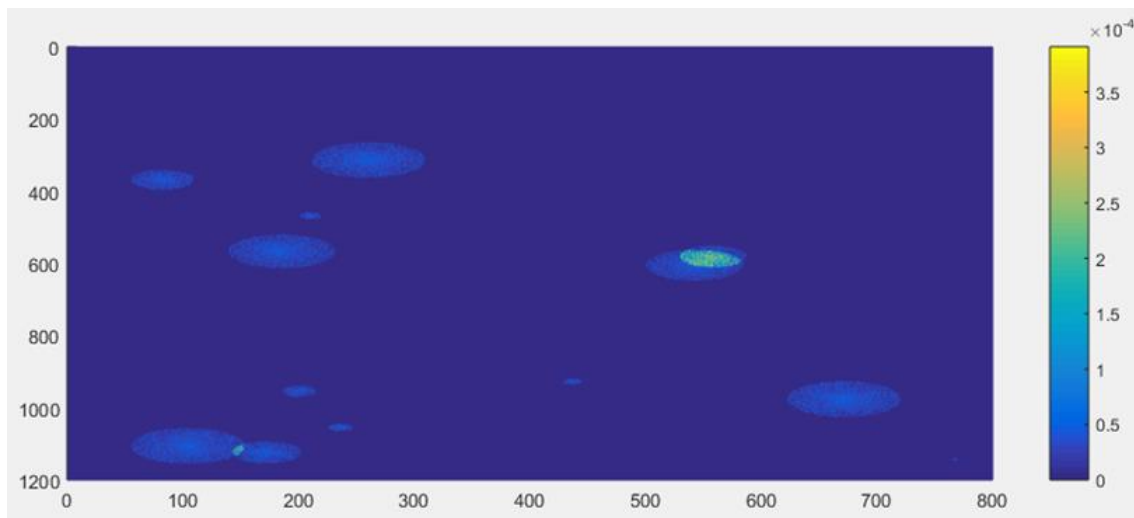


Figura 21 - Distribuição de probabilidades associadas a locais, com zonas de concentração de probabilidades mais elevadas, com maior disparidade entre as probabilidades

6.1.8 Frequência de pedidos

É também definido um intervalo para o número médio de pedidos colocados por cada 1440 unidades de tempo, o que corresponde a um dia. Aqui, pode optar-se por se ter entre dez e 15 pedidos por dia, ou entre cinco e dez pedidos por dia. Posteriormente, é obtido um valor dentro do intervalo selecionado, que será usado para se determinar o número total de pedidos que irão ocorrer dentro do horizonte temporal definido. Em algumas das instâncias consideradas foram usados outros intervalos.

Ao criar cada pedido, é garantido que o instante em que ele é conhecido se encontra dentro do horizonte temporal definido, no entanto isso poderá não acontecer para os instantes associados às janelas temporais. Assim, após a criação do conjunto de pedidos, analisa-se cada um deles, e são excluídos aqueles que não puderem ser satisfeitos sem comprometer o regresso à sede dentro do horizonte temporal definido. Assim, pode acontecer que o número total de pedidos

efetivamente considerado, não corresponda ao intervalo definido para o número de pedidos por dia.

6.1.9 Antecedência

A antecedência associada a determinado pedido corresponde à diferença entre o instante em que o pedido é conhecido, e o instante em que se inicia a janela temporal do respetivo local de carga. Optou-se por impor um máximo de 1440 unidades de tempo (o que corresponde a um dia) para essa diferença, sendo definida uma probabilidade de se ter uma antecedência inferior a 720 unidades de tempo (o que corresponde a 12 horas). Essa probabilidade poderá ser de 20%, caso se pretenda que haja a tendência para os pedidos serem conhecidos com maior antecedência, de 80%, caso se pretendam menores antecedências, ou de 100% o que fará com que todos os pedidos tenham uma antecedência inferior a 720.

6.1.10 Amplitude das Janelas Temporais

À semelhança do que sucede para a antecedência, o período de tempo entre o início e o término de cada janela temporal será não superior a 1440 unidades de tempo. Neste parâmetro, pode optar-se por atribuir um valor de 80% ou de 20% à probabilidade de ser atribuído, a cada pedido, um valor inferior a 720 unidades de tempo.

À semelhança do que se referiu para a frequência de pedidos, aqui também ocorrem ajustes aos pedidos gerados. Em particular, para cada pedido poderá ser antecipado o fim da janela temporal associada à carga ou adiado o início da janela temporal associada à descarga. Esses ajustes ocorrem se, após análise às janelas temporais, em que é também considerada a distância entre os locais e o tempo de serviço na carga, se verificar que há determinado intervalo de tempo contido em algumas das janelas temporais, composto por instantes que não poderão corresponder a instantes de visita do respetivo local.

6.1.11 Folga

Os valores atribuídos ao início e término das janelas temporais associadas a determinado pedido, juntamente com as coordenadas associadas a cada um dos respetivos locais, poderão fazer com que não seja possível satisfazer esse pedido. Não sendo desejável que isso ocorra, é atribuído a cada pedido um valor, que aqui se designa por folga, e que, adicionado à duração da viagem entre o respetivo local de carga e o respetivo local de descarga, corresponde à diferença entre o término da janela temporal da descarga e o início da janela temporal da carga.

Ao impor que a folga seja não negativa, evita-se a exclusão de pedidos por incoerência nos valores acima referidos, e permite-se que possa haver margem para que, entre o local de carga e o local de descarga de cada pedido, sejam possíveis eventuais desvios no sentido de efetuar visitas a outros locais.

A probabilidade de cada folga ser inferior a 720 unidades de tempo poderá ser de 80% ou de 20%, e o valor não poderá ser superior a 1400 unidades de tempo.

6.1.12 Cargas

As quantidades de carga associadas a cada pedido terão de corresponder a valores inteiros positivos, não podendo haver quantidades de carga superiores à capacidade definida para os veículos. Neste parâmetro pode definir-se uma probabilidade de cada pedido ter uma carga inferior a 16 unidades de 20% ou de 80%.

Como se referiu, em várias instâncias a capacidade considerada foi de três unidades de carga, em alternativa a 33 unidades. Nesses casos, a carga associada a cada pedido será de uma unidade.

6.1.13 Tempos de Serviço

A cada carga e cada descarga são atribuídas durações. Optou-se por se atribuir uma componente fixa e uma componente variável, que depende das unidades de carga do pedido respetivo, a cada carga e a cada descarga. No gerador de instâncias são usadas variáveis distintas para as cargas e para as descargas, no entanto é atribuído por defeito o valor de dez unidades de tempo às componentes fixas de ambas, e de uma unidade de tempo por unidade de carga a ambas as componentes variáveis.

Na formulação apresentada no Capítulo 5, e que foi implementada, não se consideram tempos de serviço, pelo que se optou pela exclusão destes em algumas instâncias, no sentido de se comparar as soluções obtidas pelas heurísticas com as obtidas pelo método exato.

6.2 Instâncias geradas

Como já referido, em algumas das instâncias consideradas foram usados valores que não são disponibilizados no gerador de instâncias, ou distintos dos fixados pelo gerador de instâncias. Em particular, no caso do número de veículos, em diversas instâncias optou-se por especificar um valor, em alternativa a definir um intervalo.

Nas primeiras quatro instâncias, o horizonte temporal considerado foi de 10080 unidades de tempo (uma semana), e foi usado cada um dos algoritmos em todas as decisões (ou instâncias estáticas). No entanto, esta opção levou a tempos de execução elevados.

No caso dos algoritmos com Algoritmo Genético, a duração de cada decisão é não inferior a cinco segundos. Para uma instância em que haja mais de 50 decisões, cada execução de um desses algoritmos tende a demorar mais de cinco minutos. Considerando que para cada instância e cada um desses algoritmos são realizadas 20 execuções, e que são considerados seis algoritmos que recorrem ao Algoritmo Genético, o tempo total necessário para todas as execuções, no caso de um instância com 50 decisões, pode ser superior a dez horas.

Assim, após se proceder da forma referida para as primeiras quatro instâncias, procurou-se uma alternativa que permitisse menores tempos de execução. Uma possibilidade passaria por reduzir o horizonte temporal, o que, mantendo as restantes características, em particular o número de pedidos por dia, iria levar a um menor número de decisões. No entanto, se o número de pedidos considerado fosse demasiado pequeno, isso iria ter impacto negativo na cenarização, uma vez que se recorre ao histórico de pedidos.

Assim, optou-se por se fazer correr um dos algoritmos mais rápidos durante a maior parte do horizonte temporal considerado, e apenas aplicar cada um dos nove algoritmos durante as decisões finais. Desta forma, a partir da 5ª instância aqui identificada são consideradas 36000 unidades de tempo (corresponde a 25 dias), sendo usado o algoritmo **H1** nas decisões que ocorrem durante as primeiras 30240 unidades de tempo (que correspondem a três semanas), e sendo executado cada um dos nove algoritmos nas decisões que ocorrem nas restantes 5760 unidades de tempo (que correspondem a quatro dias).

6.2.1 Instâncias 1 a 4

Como se referiu, nas primeiras quatro instâncias o horizonte temporal é de 10080 unidades. Foi considerada uma região retangular, e cada decisão dura dez unidades de tempo, sendo estes dois aspetos comuns a todas as instâncias.

As instâncias 1 e 2 são parametrizadas da mesma forma, mas usaram-se sementes distintas para a obtenção de valores pseudoaleatórios, pelo que as instâncias em si são distintas. A parametrização considerada para ambas é apresentada na Tabela 3.

Horizonte Temporal	10080 u.t.
Região	Rectangular (800 x 1200)
Duração Decisão	10 u.t.
Localização sede	(1,1)
Nº veículos	5
Capacidade Veículos	3 u.c.
Distribuição Locais	Zonas de concentração
Frequência Pedidos	10 a 15
Antecedência	100% inferiores a 720 u.t.
Amplitude Jan Temp	80% inferiores a 720 u.t.
Folga	80% inferiores a 1440 u.t.
Cargas	Unitárias
Tempos Serviço	Sim

Tabela 3 - Parametrização das instâncias 1 e 2

Para as instâncias 3 e 4 foi usada a parametrização descrita na Tabela 4. À semelhança do que se referiu para as instâncias 1 e 2, no caso das instâncias 3 e 4 foram usadas sementes distintas, levando à obtenção de instâncias distintas.

Horizonte Temporal	10080 u.t.
Região	Rectangular (800 x 1200)
Duração Decisão	10 u.t.
Localização sede	(400,600)
Nº veículos	10
Capacidade Veículos	33 u.c.
Distribuição Locais	Sem zonas
Frequência Pedidos	10 a 15
Antecedência	80% inferiores a 720 u.t.
Amplitude Jan Temp	80% inferiores a 720 u.t.
Folga	80% inferiores a 1440 u.t.
Cargas	20% inferiores a 16 u.c.
Tempos Serviço	Sim

Tabela 4 - Parametrização das instâncias 3 e 4

6.2.2 Instâncias 5 a 10

Para este conjunto de instâncias, o horizonte temporal total considerado é de 36000 unidades de tempo, estando repartido em dois períodos. No primeiro, é usada a heurística **H1**, e corresponde às primeiras 30240 unidades de tempo, e no segundo período será usado cada um dos nove algoritmos.

Apesar de se estar a indicar que nestas instâncias o horizonte temporal é de 36000 unidades de tempo, poderá considerar-se que o horizonte temporal corresponde apenas às 5760 unidades de tempo do 2º período, e que só fica definida

após terminar o primeiro período, uma vez que só a partir desse momento é que todas as decisões são tomadas com cada um dos algoritmos.

A única diferença entre as parametrizações das instâncias 5, 6 e 7 assenta sobre a distribuição de locais. Optou-se pelas opções 'Sem Zonas', 'Zonas de Concentração' e 'Zonas com maior disparidade' para as instâncias 5, 6 e 7, respetivamente. A restante parametrização, comum às três instâncias, é apresentada na Tabela 5.

Horizonte Temporal	36000 u.t.
Região	Rectangular (800 x 1200)
Duração Decisão	10 u.t.
Localização sede	(1,1)
Nº veículos	5
Capacidade Veículos	33 u.c.
Frequência Pedidos	1,25 a 6,25
Antecedência	80% inferiores a 720 u.t.
Amplitude Jan Temp	80% inferiores a 720 u.t.
Folga	80% inferiores a 1440 u.t.
Cargas	80% inferiores a 16 u.c.
Tempos Serviço	Sim

Tabela 5 - Parametrização comum às instâncias 5, 6 e 7

Nas instâncias 8, 9 e 10 não foram atribuídos tempos de serviço, tendo sido feita a comparação entre os resultados obtidos através da execução dos algoritmos com resultados obtidos pelo método exato implementado a partir da formulação apresentada no Capítulo 5. Note-se, no entanto, que no método exato todos os pedidos serão considerados em simultâneo. Assim, pode ser mais adequado não considerar os resultados obtidos pelo método exato como soluções ótimas, mas sim como limites que se pretende que contribuam para análise do desempenho dos nove algoritmos.

Com exceção da exclusão de tempos de serviço, toda a parametrização das instâncias 8, 9 e 10, corresponde à das instâncias 5, 6 e 7, respetivamente. Consideram-se ainda as instâncias 8', 9' e 10', que correspondem às instâncias 8, 9 e 10, mas em que todos os pedidos do período 2 serão conhecidos simultaneamente, de acordo com o referido acima relativamente à execução do método exato. Serão também apresentados resultados da execução dos nove algoritmos, para as variantes 8', 9' e 10'.

7. Algoritmos

Foram implementados nove algoritmos distintos para abordar o problema (estático), apresentando-se, no início deste capítulo, aspetos que os distinguem. Na secção 7.2 descreve-se uma heurística de inserção que foi usada em três dos algoritmos, e na secção 7.3, é apresentado um Algoritmo Genético, que foi usado nos restantes. Por fim, caracteriza-se cada um dos nove algoritmos concebidos.

7.1 Aspetos que Distinguem os Algoritmos

7.1.1 Alterações a rotas previamente definidas

Está a considerar-se que uma solução para determinada instância estática é composta por um conjunto ordenado de visitas para cada um dos veículos considerados. Assim, em cada decisão fica determinado, para cada veículo, um conjunto de locais a visitar e, a ordem pela qual essas visitas irão ocorrer.

No início de cada decisão é conhecido o posicionamento da frota e uma rota definida para cada um dos veículos da mesma. Com exceção do que sucede na primeira decisão, o conjunto de rotas será o resultado de uma ou mais decisões anteriores. Um aspeto que distingue os algoritmos elaborados, é a possibilidade de se proceder a alterações às rotas definidas em decisões anteriores.

Em alguns dos algoritmos implementados, optou-se por não se proceder a modificações a ordenações relativas definidas em decisões anteriores, o que implica que qualquer local que em dada decisão fique associado à rota de um veículo será obrigatoriamente visitado por esse veículo. Noutros algoritmos poderão ocorrer alterações ao que foi definido nas decisões anteriores, desde que a solução identificada seja admissível. O conjunto de algoritmos em que não ocorrem essas alterações coincide com aqueles em que será usada uma heurística de inserção, e o conjunto de métodos em que poderão ocorrer alterações a ordens de visita corresponde aos que utilizam um Algoritmo Genético.

7.1.2 Abordagem às folgas

De acordo com o que se referiu, cada solução determina ordens de visita. Por sua vez, ao definir ordens de visita, e considerando as janelas temporais associadas a cada um dos locais, ficam implicitamente definidos intervalos para os instantes em que cada uma dessas visitas poderá ocorrer, ainda que não exista uma definição precisa desses instantes de visita. Ao implementar uma decisão, é essencial que se definam esses instantes de visita, dado que isso tem impacto no posicionamento da frota no início da decisão imediatamente posterior. e no conjunto de locais visitados entre essas decisões.

Acrescente-se que se está a considerar que um instante de visita associado a um local terá de respeitar a respetiva janela temporal, no entanto um veículo poderá alcançar o local antes do início dessa janela temporal. Assim, poderá ocorrer que, no caso de um local de carga ou de descarga, o instante de visita não coincida com o instante em que o veículo alcança esse local. Para cada um dos locais de carga ou descarga j , importa portanto distinguir um instante de visita, T_j de um instante de chegada, T'_j , verificando-se que $T_j = \max \{T'_j, e_j\} \leq l_j$, em que e_j e l_j correspondem, respetivamente, ao limite inferior e ao limite superior da janela temporal associada ao local j .

Considerem-se dois locais p_1 e p_2 visitados pelo mesmo veículo, de acordo com a solução obtida numa decisão i , e sejam T_1 e T_2 , com $T_1 \leq T_2$, os instantes das visitas aos locais p_1 , e p_2 , respetivamente, estando definido o instante T_1 . Seja $d_{p_1 p_2}$ o tempo de viagem entre os dois locais, s_1 o tempo de serviço associado ao local p_1 , l_2 o instante em que termina a janela temporal associada ao local p_2 , e T'_2 o instante de chegada ao local p_2 . Então, fica definido um intervalo para o instante de chegada a p_2 , dado por $T_1 + s_1 + d_{p_1 p_2} \leq T'_2 \leq l_2$. Assim, o instante de visita a p_2 irá verificar $\max \{T_1 + s_1 + d_{p_1 p_2}, e_2\} \leq T_2 \leq l_2$, em que e_2 corresponde ao início da janela temporal do local p_2 .

A folga que ficará associada ao local p_2 vai corresponder à diferença entre $\max \{T_1 + s_1 + d_{p_1 p_2}, e_2\}$, o menor instante em que o local p_2 poderá ser visitado, e $T_1 + s_1 + d_{p_1 p_2}$, o menor instante em que o local p_2 poderá ser alcançado. Uma vez que $\max \{T_1 + s_1 + d_{p_1 p_2}, e_2\} \geq T_1 + s_1 + d_{p_1 p_2}$, tem-se que cada folga será não negativa.

As folgas estão portanto relacionadas com a possibilidade de determinado veículo chegar a determinado local de carga ou de descarga antes de se iniciar a respetiva janela temporal. Cada folga irá corresponder a um período de inatividade, na medida em que corresponde à diferença entre o instante em que o veículo está disponível para iniciar determinada tarefa, e o instante em que essa tarefa poderá ser iniciada.

São contempladas dois critérios para abordar a ocorrências de folgas:

- **Com espera** – após ficar disponível, o veículo irá permanecer inativo no local p_1 , e apenas se irá dirigir para o local p_2 no instante $e_2 - d_{p_1 p_2}$, alcançado esse local precisamente no instante e_2 . Com este critério, tem-se que $T_2 = T'_2$.
- **Sem espera** – assim que se encontre disponível, o veículo dirige-se imediatamente para o local p_2 , onde irá permanecer inativo.

Estando definido um destes critérios, ficam definidos todos os instantes de visita associados a uma solução. Para que se determine cada instante de chegada, é necessário conhecer o instante de chegada do local visitado imediatamente antes, pelo mesmo veículo. Assim, importa salientar que, no caso da posição atual de cada veículo, que corresponde necessariamente à primeira visita da respetiva rota, está definido que o instante de chegada é o instante inicial.

7.1.3 Cenários previsionais

A maior parte dos métodos usados recorrem a um Algoritmo Genético comum. No entanto, enquanto em alguns desses métodos é implementada a melhor decisão identificada com base na informação conhecida, noutros procura-se tomar uma decisão que, podendo não ser a melhor das que se identificaram para a instância estática que se está a considerar, possa beneficiar o resultado acumulado das várias decisões, levando a uma melhor solução para a instância do meta-problema.

Procurando obter esses benefícios, terminada a execução do Algoritmo Genético associada a determinada decisão, em que ficará registado um conjunto de soluções, são gerados cenários previsionais que correspondem a conjuntos de pedidos e é avaliada a adequação de cada uma das soluções registadas a cada um dos cenários.

Cada cenário é obtido a partir do histórico de pedidos, que consiste no conjunto de pedidos conhecidos no instante associado à decisão que estiver a ser tomada. É previamente definido o número de cenários a gerar, bem como um horizonte temporal associado a cada cenário. Considerando que uma decisão está associada a um instante t , sendo conhecidos até esse instante n pedidos, e que o horizonte temporal associado aos cenários tem amplitude $h > 0$, o número de pedidos que ficarão associados a determinado cada cenário, k , corresponde ao menor inteiro não inferior a $n * h / t$, que corresponde à média de pedidos colocados por cada h unidades de tempo.

Uma vez determinado o número de pedidos considerados em cada um dos cenários, é obtida uma amostra de k pedidos em histórico, e são gerados k instantes positivos não superiores a h . Cada instante obtido, que será designado por instante de referência, irá substituir o instante de colocação de cada um dos pedidos da amostra. A diferença entre cada par de instantes associados ao pedido previsto correspondem ao que se verifica no pedido extraído do histórico, mas usando o instante de referência em alternativa ao instante de colocação. Mais propriamente, se for selecionado um pedido do histórico com instante de colocação $t(i)$, janela temporal da carga $[e(i^+), l(i^+)]$, e janela temporal da descarga $[e(i^-), l(i^-)]$, e que o instante de referência do pedido previsto é $t'(i)$, então a janela temporal obtida para o local de carga será dada por $[e(i^+) - t(i) + t'(i), l(i^+) - t(i) + t'(i)]$, e a do local de descarga por $[e(i^-) - t(i) + t'(i), l(i^-) - t(i) + t'(i)]$. Relativamente às coordenadas dos locais e da carga associada ao pedido, não são aplicadas quaisquer alterações.

Realça-se que cada instante de referência não será um instante de colocação previsto. Optou-se por se considerar que todos os pedidos previstos ficam com instante de colocação igual ao instante associado à decisão. Além de servir para obter janelas temporais, o instante de referência serve também para associar uma ordenação aos pedidos associados a cada cenário previsional.

Após terem sido gerados todos os cenários previsionais, procede-se à inserção dos respetivos pedidos em cada uma das rotas obtidas pelo do Algoritmo Genético. Para cada solução registada, e cada cenário previsional, são percorridos os pedidos previstos nesse cenário por ordem crescente de instante de referência. Para cada pedido previsto, são identificadas todas as inserções admissíveis na rota. Se existirem inserções admissíveis para esse pedido, é realizada a que corresponder ao menor incremento na distância total, passando a considerar-se o pedido previsto seguinte.

Para cada cenário e cada solução, ficará registado um valor que corresponde à soma entre o número total de pedidos "reais" visitados nessa solução e o número total de pedidos previstos que foi possível inserir, e um valor que corresponde à distância total obtida após essas inserções. Após terem sido considerados todos os cenários e todas as soluções, e selecionada uma solução, com base em determinado critério, em que se consideram os valores obtidos para cada uma das soluções.

Considera-se que o método aqui descrito não permitirá obter boas previsões. Foi inicialmente contemplada a possibilidade de recorrer em simultâneo a outra forma de obter previsões. Pretendia-se usar o método acima descrito para obter previsões piores, assumindo-se que tendencialmente levariam a piores resultados, enquanto a segunda forma de obter previsões a implementar permitiria obter melhores resultados, que conjuntamente se consideraria como limites para resultados de um método de previsão "real". No entanto, para se reduzir o número elevado de algoritmos contemplados, optou-se por apenas manter o método descrito.

7.1.4 Critérios de seleção na cenarização

Como se referiu, quando se recorre a cenários previsionais, ficam registados dois valores para cada solução e cada cenário, sendo um dos valores relativo ao número de pedidos satisfeitos e outro relativo à distância total. Esses valores são usados para se obterem dois indicadores, um deles para o número de pedidos e outro para a distância percorrida, sendo depois selecionada qual das soluções será implementada. A obtenção desses indicadores poderá ser efetuada de duas formas:

- **melhor pior caso** – para cada solução é apenas considerado o pior par de registos (número de pedidos e distância total percorrida) obtidos pela mesma;
- **desempenho médio** – para cada solução, os indicadores correspondem à média de pedidos satisfeitos e a média da distância total percorrida.

Após se obterem esses indicadores para cada uma das soluções, é selecionada a melhor com base nos valores obtidos para esses indicadores, ou seja, é selecionada a que tiver o maior valor do indicador para o número de pedidos satisfeitos e, havendo mais do que uma em que o indicador para o número de pedidos satisfeitos seja não inferior a qualquer outro, é identificada uma delas recorrendo-se ao indicador para a distância percorrida, optando-se pela que corresponder ao menor valor nesse indicador.

7.2 Heurística de Inserção

Em cada instante em que se inicie uma tomada de decisão, a que estará associada uma instância estática, haverá um conjunto de rotas definidas, existirá pelo menos um pedido que não se considerou em decisões anteriores, composto por um local de carga e um local de descarga, e que aqui se designa por pedido novo. A heurística de inserção consiste em identificar formas de inserir um pedido novo em alguma das rotas definidas na decisão imediatamente anterior, em que não se altere a ordem relativa das visitas de qualquer das rotas que estivessem previamente definidas.

Caso em determinada instância estática exista mais do que um pedido novo, a ordem de inserção desses pedidos estará de acordo com os instantes de colocação associados a esses pedidos. Nestes casos, as rotas resultantes de uma inserção realizada com sucesso, também não poderão ter as respetivas ordens relativas de visita alteradas.

Foi associado um parâmetro a esta heurística, que define se a inserção de um local de carga poderá ser efetuada entre quaisquer duas visitas consecutivas, ou se apenas poderá ser efetuada no final de cada rota. No segundo caso, se determinada rota incluir alguma visita a um local de carga ou de descarga (antigo), a visita ao local de carga do pedido novo só poderá ocorrer entre a última dessas visitas previstas, e o regresso ao armazém. Em qualquer dos casos, é posteriormente inserida a visita ao local de descarga desse mesmo pedido novo, que só poderá ocorrer após a visita ao local de carga.

Considere-se que em determinada instância existe um pedido novo, estando a ser considerados k veículos. Caso esteja definido que o pedido apenas pode ser inserido no final de uma rota, então poderão ser obtidas até $k + 1$ soluções, que correspondem à inserção numa das k rotas, e à não realização de uma inserção, o que irá ocorrer caso nenhuma dessas k inserções seja admissível. Se não for imposta esta limitação, para uma rota i , em que sejam visitados n_i locais, em que o conjunto de locais visitados inclui a posição atual do veículo mas exclui o regresso ao armazém, então o número de formas distintas de incluir nessa rota as visitas ao local de carga e ao local de descarga do pedido novo, sem modificar a ordem relativa das restantes visitas, é dada por $n_i * (n_i + 1) / 2$.

Na Figura 22, são ilustradas as diferentes formas de inserir um pedido novo, consoante o que se define para o parâmetro descrito. No cenário considerado, existem dois veículos, tendo sido definida na decisão anterior uma rota com três visitas previstas (aos locais 1, 2 e 3, por essa ordem), e outra com duas visitas previstas (aos locais 4 e 5, por essa ordem). Note-se que cada uma das soluções que

podem ser obtidas, com exceção daquelas em que não são aplicadas inserções, poderá não ser admissível por levar a um excesso de carga no veículo, ou por não respeitar as janelas temporais associadas a um ou mais locais. São excluídas as soluções, não admissíveis, em que o local de carga (local 6) do pedido novo seja visitado após o respetivo local de descarga (local 7), ou em que estes sejam visitados por veículos distintos.

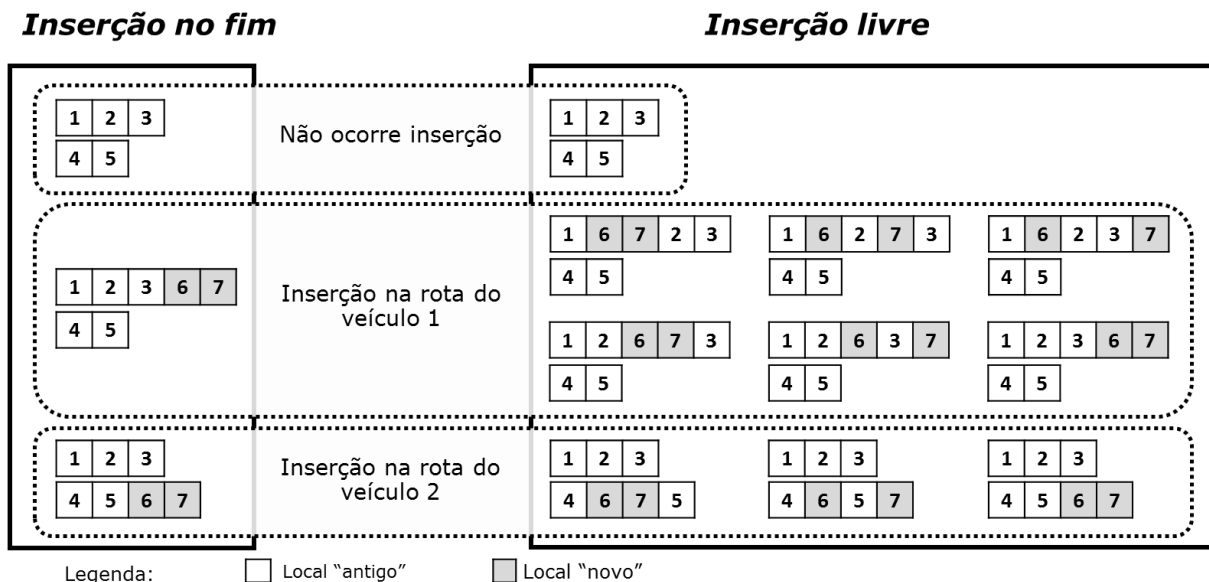


Figura 22 - Comparação entre número de soluções consideradas em cada critério de inserção

Na situação ilustrada na Figura 22, ao apenas permitir inserções no final de cada rota apenas serão consideradas três soluções. Sem essa restrição serão analisadas dez soluções distintas, em que se incluem as três anteriores.

Com as duas variantes da heurística de inserção que daí resultam, pretende-se obter limites para o que poderia ser uma decisão mais intuitiva. Considera-se que o primeiro critério tenderá a conduzir a soluções piores do que as que resultariam de uma análise humana, e o segundo critério permitirá alcançar soluções melhores.

7.3 Algoritmo Genético

Foi construído um Algoritmo Genético, com o qual se pretende obter soluções melhores do que as verificadas pela heurística de inserção. Na maior parte dos algoritmos considerados recorre-se a esta meta-heurística. Na Figura 23 é apresentado o fluxograma em que se relacionam os processos englobados no Algoritmo Genético.

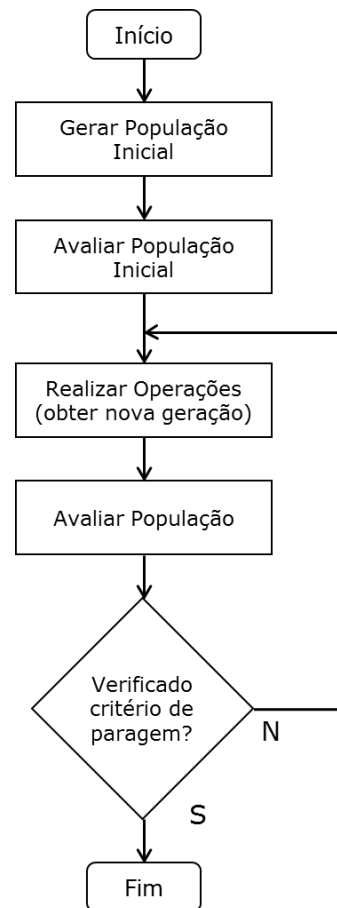


Figura 23 – Fluxograma Algoritmo Genético

Em seguida, é explicada a codificação usada no Algoritmo Genético construído. Nas secções seguintes, é descrito cada um dos processos identificados no fluxograma.

7.3.1 Codificação

De acordo com a descrição do problema, para cada veículo existe um conjunto de locais de visita obrigatória verificando-se que, dados dois veículos distintos, os respetivos conjuntos de visitas obrigatórias são disjuntos. Em adição ao conjunto de locais de visita obrigatória, existe um conjunto de locais de visita opcional, composto por um número igual de locais de carga e de descarga, havendo, para cada local de carga, um e só um local de descarga, na medida em que pertencem ao mesmo pedido.

Ao contrário do que sucede para os locais de visita obrigatória, nenhum dos locais de visita opcional está previamente associado a algum dos veículos. No entanto, considera-se vantajoso que antes de se iniciar a execução do algoritmo em causa, se faça uma análise de compatibilidade, verificando-se, por exemplo, se a partir do local em que cada veículo se encontra no instante inicial, poderá haver um ou mais locais

opcionais que não possam ser alcançados antes do término de cada uma das respectivas janelas temporais. Caso isso se verifique para algum veículo e algum local opcional, poderá definir-se à partida que esse veículo não irá visitar nem esse local (de carga ou descarga), nem o local (de descarga ou carga, respetivamente) que esteja associado ao mesmo pedido que o primeiro, procurando com isso alcançar ganhos no tempo de execução do algoritmo.

A estrutura de cada cromossoma será um vetor de comprimento igual à soma do número de locais obrigatórios com o produto entre o número de veículos pelo número de locais opcionais. Considerando que existem k veículos, que a cada veículo i corresponde um número de locais obrigatórios n_i , e que existem m locais opcionais, com $N_j = \sum_{i=1}^j n_i + j * m$, $1 \leq j \leq k$, cada cromossoma terá comprimento N_k , com $n_i + m$ posições associadas a cada veículo i , e terá a estrutura apresentada na Figura 24. Em alternativa a considerar um número de locais opcionais comum a todos os veículos, poderia, optar-se, caso ocorresse uma verificação prévia de compatibilidade entre veículos e locais opcionais, por se atribuir a cada um dos veículos um número de locais opcionais que não considerasse os locais excluídos nessa verificação.

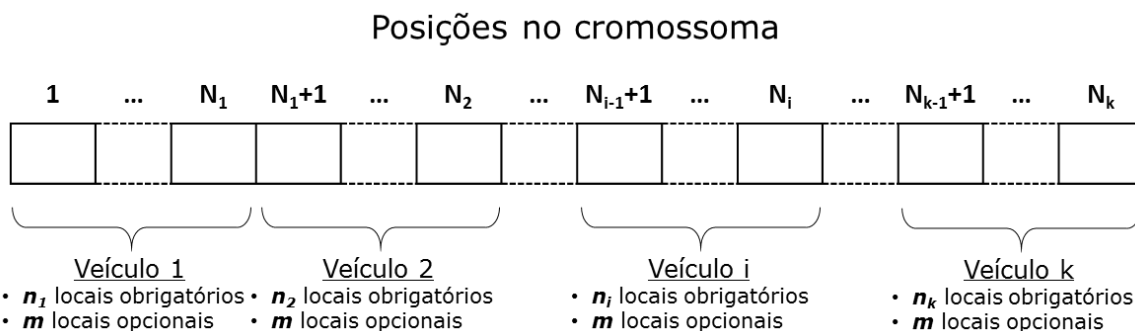


Figura 24 - Correspondência entre veículos e posições nos cromossomas

Realça-se que na Figura 24 estão representados os conjuntos de posições do cromossoma, ou segmentos, referentes a cada um dos veículos, não se estando a associar posições do cromossoma a locais.

A i -ésima posição de cada segmento ficará preenchida com o i -ésimo local a ser visitado pelo veículo a que esse segmento diz respeito. Sendo h o número de locais visitados por um veículo j , e caso se tenha $h < n_j + m$, então apenas ficarão preenchidos as primeiras h posições do segmento, ficando as restantes $n_j + m - h$ posições preenchidas com valores nulos. Os locais iniciais dos veículos correspondem aos primeiros locais visitados por cada um deles, pelo que a primeira posição de cada segmento ficará associada ao local inicial do respetivo veículo. Mais propriamente, a posição 1 corresponderá ao local inicial do veículo 1, e cada posição N_j+1 , com $1 \leq j \leq k - 1$, corresponderá ao local inicial do veículo j .

Havendo vários veículos, e vários pedidos opcionais, será expectável que as afetações de locais opcionais estejam repartidas entre mais do que um veículo, o que provocará valores nulos em todos os segmentos. Em cada cromossoma que corresponda a uma solução admissível, sem locais associados a mais do que um veículo, haverá um mínimo de $(k-1)*m$ valores nulos. Mais propriamente, se houver $l \leq m$ locais opcionais que não sejam visitados por nenhum veículo, o respetivo cromossoma, terá $(k-1)*m+l$ valores nulos.

Considera-se que a estrutura adotada para os cromossomas poderá ter um impacto negativo em termos de eficiência computacional. Refira-se que foi contemplada a utilização de uma codificação distinta com cromossomas de comprimento igual ao número de locais $N = \sum_{i=1}^j n_i + m$, em que se usariam os locais iniciais dos veículos para se separar as respetivas rotas. Na Figura 25 é representado esse cromossoma alternativo, correspondendo cada valor $S(j)$, em que $1 \leq j \leq k$, à posição do cromossoma ocupada pelo local inicial do veículo j . Além da diferença entre o comprimento dos cromossomas, esta alternativa também difere da anterior por não ser estática a posição e comprimento do segmento associado a cada um dos veículos, podendo recorrer-se ao identificador de cada um dos locais iniciais para se identificar o segmento que lhe está associado.

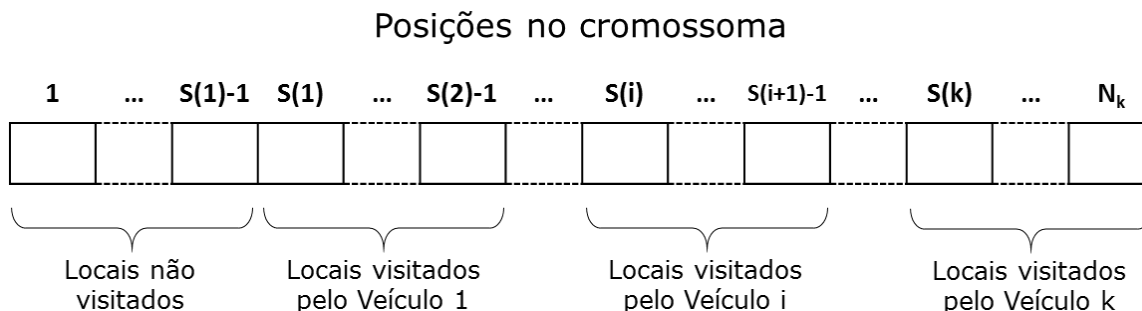


Figura 25 – Ilustração de uma codificação alternativa

Durante a definição do funcionamento do Algoritmo Genético, considerou-se que seria interessante explorar a possibilidade de se considerar cada veículo individualmente ao aplicar as operações, não se evitando que em determinados momentos fosse necessário considerar o conjunto de rotas em simultâneo. Isso foi determinante para se ter optado pela primeira codificação descrita, uma vez que permite que o segmento referente a cada veículo tenha o mesmo posicionamento e o mesmo comprimento independentemente do indivíduo considerado.

Assim, no algoritmo construído existem etapas em que se foca cada uma dos k veículos ou, mais propriamente, cada um das k subpopulações, e outras em que se considera a população global. Na Figura 26, é ilustrada a repartição da população

global nas várias subpopulações, considerando-se que uma população de dimensão d .

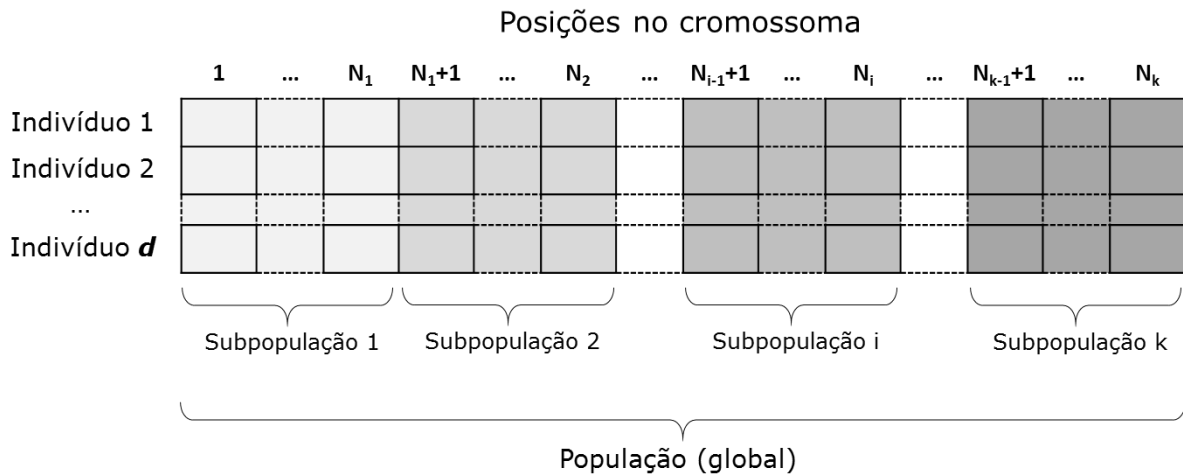


Figura 26 - Repartição da população global em subpopulações

Ao considerar cada uma das subpopulações individualmente, todos os indivíduos corresponderão a uma solução admissível no que diz respeito ao veículo associado à subpopulação. No entanto, ao considerar a população global, poderá ocorrer que em determinados indivíduos haja locais opcionais visitados por vários veículos, o que não corresponde a uma solução admissível para o problema. Neste caso, para cada local (de carga ou de descarga) i , que seja visitado $r_i > 1$ vezes, poderá ser removido qualquer conjunto de $r_i - 1$ visitas a esse local, sem que sejam quebradas outras restrições, ou seja, com a garantia de que a solução obtida é admissível, desde que as remoções de visitas ao local j (de descarga ou de carga, respetivamente) que está associado ao mesmo pedido que o local i , ocorram nas mesmas rotas em que foram removidas visitas ao local i . Nota-se que, para cada rota, irá ocorrer uma visita ao local i se e só se ocorrer uma visita ao local j , pelo que, em termos globais, se irá verificar $r_i = r_j$.

7.3.2 População inicial

Na obtenção da população inicial, são consideradas as subpopulações. Para cada veículo, obtém-se primeiro o conjunto de locais com visita obrigatória, e é definido que a ordem de visita desses locais, nos indivíduos da respetiva subpopulação inicial, será a mesma que foi definida na decisão imediatamente anterior.

Na primeira das decisões que serão tomadas, todas as visitas obrigatórias correspondem ao armazém por ser este o local em que os veículos se encontram no instante inicial, pelo que a cada veículo estará associada apenas uma visita obrigatória. Para cada subpopulação, são percorridos, por ordem aleatória, todos os

pedidos opcionais considerados compatíveis com o veículo em questão. Para cada um desses pedidos, são analisadas todas as formas de se inserir os locais de carga e de descarga desse pedido, em que a visita ao local de carga precede a visita ao local de descarga. Se for identificada alguma forma de se fazer a inserção em que se obtenha uma rota admissível, isto é, em que não se comprometa o cumprimento de janelas temporais nem se exceda a capacidade do veículo, é realizada uma dessas inserções aleatoriamente. Após serem percorridos todos as subpopulações, e considerados, para cada subpopulação, todos os locais compatíveis, fica então obtida a população inicial.

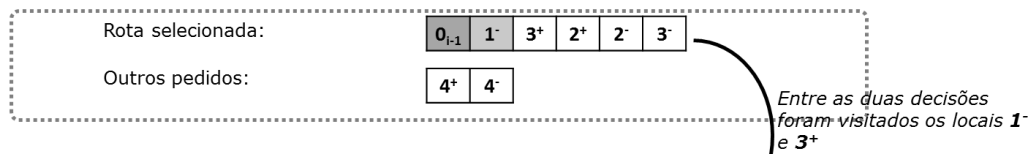
Numa primeira implementação, recorreu-se ao método acima descrito para todas as decisões. Em cada uma das restantes decisões $i > 1$, também se começava por considerar os locais de visita obrigatórios, podendo haver veículos com mais do que uma visita obrigatória, ao contrário do que sucedia na primeira decisão. Para cada veículo, a ordenação de visitas a locais obrigatórios em todos os indivíduos da respetiva subpopulação inicial, correspondia à da rota que definida na decisão imediatamente anterior, $i - 1$, para esse veículo. Note-se que ficavam contempladas todas as visitas a locais obrigatórios, uma vez que, para que um local fosse de visita obrigatória para a decisão i , era necessário que na decisão anterior estivesse prevista a visita a esse local.

Após estar definida a ordem relativa de visita aos locais obrigatórios para todos os indivíduos de cada subpopulação, eram então contemplados os locais opcionais, procedendo-se da mesma forma que foi acima descrita para a primeira decisão.

Na Figura 27 é ilustrado este método de geração da população inicial, numa decisão i , para determinado veículo. É representada a rota definida numa decisão anterior, em que se visita um local obrigatório (local 1^-), e são satisfeitos dois pedidos (quatro locais), havendo um único pedido que não foi contemplado na rota, composto pelo local de carga 4^+ e pelo local de descarga 4^- (pode ter ficado associado à rota de outro veículo, ou não ter ficado associado a nenhuma rota). Antes de se iniciar a decisão i , o veículo realiza as duas primeiras visitas (aos locais 1^- e 3^+). A parte da rota definida na decisão $i-1$ que no início da decisão i ainda não se realizou corresponde à rota inicialmente considerada na decisão i . Depois, é removido o pedido 2, composto pelos locais 2^+ e 2^- , que é o único pedido opcional (uma vez que o local de carga 3^+ já foi visitado, o local de descarga 3^- passa a ser obrigatório), ficando a rota apenas com locais obrigatórios, sendo que existem três pedidos a satisfazer: o pedido 4, que não estava associado à rota na decisão anterior, o pedido 2, que foi removido da rota, e o pedido 5, que é um pedido novo. Posteriormente, os três pedidos são ordenados aleatoriamente, e essa ordem é usada para se fazerem

as respetivas inserções na rota. No exemplo da Figura 27, foi inserido o pedido 5, não tendo sido identificadas formas de inserir os restantes dois pedidos.

Resultado da Decisão i-1



Obtenção de indivíduo na Decisão i

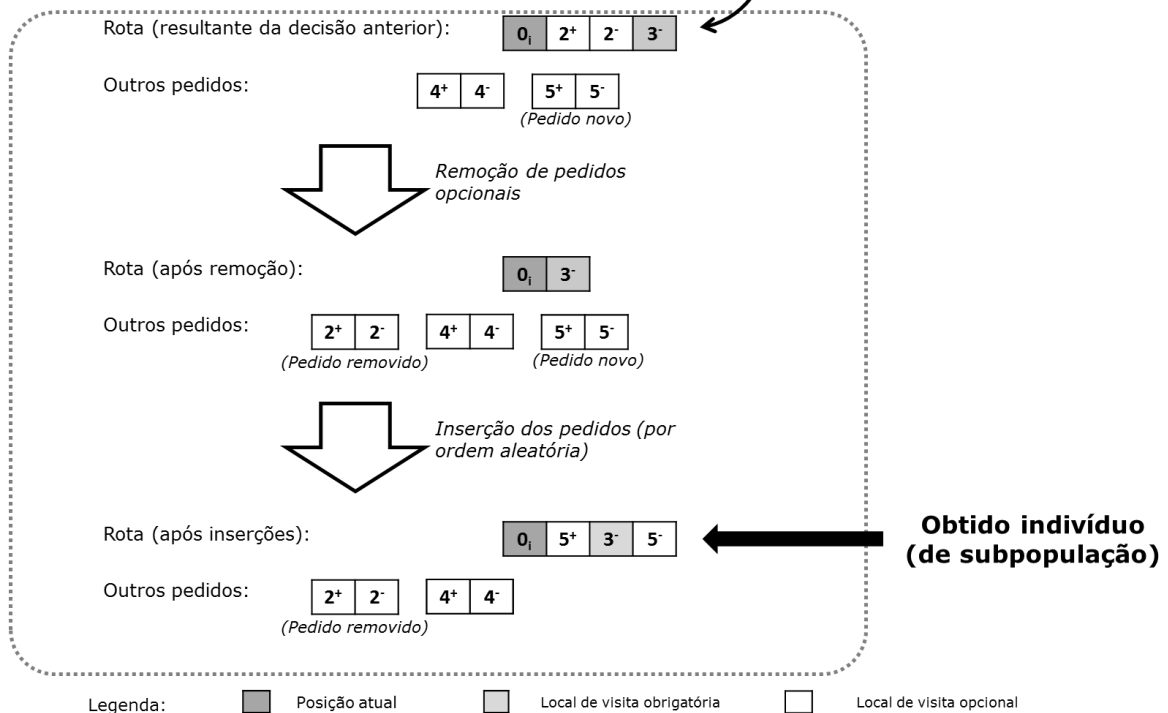


Figura 27 - Obtenção de indivíduos da população inicial na primeira implementação

Realce-se que o indivíduo obtido no exemplo da Figura 27 é um indivíduo de uma subpopulação, e não da população global. O processo ilustrado repete-se para se gerar os outros indivíduos da mesma subpopulação, e também para cada um dos indivíduos das restantes subpopulações.

A utilização deste método em todas as decisões conduziu a resultados pouco satisfatórios, verificando-se em várias instâncias que alguns dos algoritmos que recorrem à heurística de inserção levavam a resultados melhores. Considerou-se que um dos motivos para não se estar conseguir um melhor desempenho estaria relacionado com a forma de se obter a população inicial. Considerou-se que na heurística de inserção o facto de nunca se alterarem ordens relativas definidas em decisões anteriores, e apesar das limitações que daí resultam, tem o benefício de transportar muita informação entre decisões. No entanto, o método acima descrito para gerar as populações iniciais, e apesar de se preservar a ordem relativa no caso

das visitas obrigatórias, não se recorria a informação sobre as visitas opcionais. Além disso, considerou-se também que, ao extrair informação da decisão anterior, seria benéfico que não recorre apenas à solução executada, mas também a outras que tivessem sido consideradas “boas”.

Assim, optou-se por modificar a forma de obter as populações iniciais, com exceção da primeira decisão. No final de cada decisão, é obtido um conjunto de rotas “boas”, necessariamente admissíveis, em número igual à dimensão de cada população global. Na decisão seguinte, começa-se por se usar esse mesmo conjunto de rotas para se gerar a população inicial. Note-se, no entanto, que poderá haver locais contemplados numa decisão $i - 1$, que no instante associado à decisão i já terão sido visitados, além de poder haver veículos que entre as duas decisões se moveram, levando a alterações ao conjunto de posições iniciais. Portanto, com exceção da rota que tiver sido efetivamente implementada, poderá haver rotas que na decisão $i - 1$ eram admissíveis mas que, devido a eventuais visitas entretanto realizadas ou a um diferente posicionamento da frota, poderão não ser admissíveis na decisão i .

Pelo que se refere, poderá ocorrer a necessidade de tratar o conjunto de rotas, no sentido de as tornar admissíveis. Primeiro, é excluído qualquer local que já tenha sido visitado e, para cada subpopulação, são também excluídas todas as visitas a locais incompatíveis com a posição atual do veículo em análise. Posteriormente, é verificada a admissibilidade de cada uma das rotas obtidas após as exclusões que se referiram. Em cada subpopulação, cada rota não admissível é substituída por uma das rotas admissíveis. Refira-se novamente, que não irá acontecer que todas as rotas obtidas para determinada subpopulação sejam não admissíveis, uma vez que a rota obtida a partir do planeamento definido na decisão anterior será necessariamente admissível.

7.3.3 Avaliação

Considera-se que a opção de processar cada subpopulação individualmente, faz com que não seja adequado considerar que cada linha da população global corresponde a um indivíduo, uma vez que os segmentos que compõe cada linha foram obtidos de forma independente. Haverá maior potencial para que o tratamento individual de cada subpopulação traga benefícios, se puderem se considerados indivíduos compostos por qualquer conjunto de segmentos, desde que seja incorporado um e só um dos segmentos associado a cada um dos veículos.

Assim, será mais adequado que a matriz representada na Figura 26 não seja considerada um conjunto de indivíduos, mas sim vários conjuntos (um por veículo)

de componentes que podem ser combinadas para se obterem indivíduos. Desta forma, havendo k veículos e d indivíduos em cada subpopulação, poderão obter-se até d^k indivíduos, não se excluindo que possa haver indivíduos que correspondem à mesma solução. No caso particular da primeira decisão, e supondo que apenas se esteja a considerar um pedido, em cada subpopulação haverá, no máximo, duas rotas distintas (uma em que o respetivo veículo satisfaz o pedido, e outra em que não o satisfaz), e se for considerado que todos os veículos se encontram na mesma posição inicial, o que faz com que seja irrelevante qual o veículo que irá servir o pedido, apenas se poderiam obter indivíduos correspondentes a dois conjuntos de rotas (um em que algum veículo satisfaz o pedido, e outra em que nenhum veículo o satisfaz), independentemente do número de veículos, k , e do número de indivíduos em cada subpopulação, d .

O número potencial de indivíduos que se pode obter, d^k , poderá ser excessivamente elevado para que seja viável uma análise exaustiva. Por esse motivo, optou-se por se definir antecipadamente o número de indivíduos que serão gerados, D . Antes de se construírem indivíduos, é analisada cada uma das subpopulações no sentido de verificar se existe duplicação de rotas, sendo eliminadas as excedentes. Posteriormente, procura-se garantir que em cada subpopulação todos os elementos são utilizados na construção de indivíduos aproximadamente o mesmo número de vezes, definindo-se um limite superior para o número de vezes que cada elemento poderá ser usado, dado pelo menor inteiro não inferior a d'/D , em que d' corresponde ao número de elementos que restaram na subpopulação em questão, após a remoção de elementos iguais.

Procede-se então à obtenção de indivíduos, sendo cada um deles composto por um e só um elemento de cada uma das subpopulações. Como foi anteriormente referido, poderá ocorrer que sejam obtidos indivíduos em que há pedidos satisfeitos por mais do que um veículo. De forma a obter soluções admissíveis, é ainda necessário excluir visitas repetidas. Nesse sentido, após serem selecionadas as componentes que serão usadas para formar um indivíduo, são identificados todos os pedidos visitados por mais do que um veículo, e eliminadas visitas em excesso de forma aleatória.

Após o processo acima referido, em que fica garantido que cada um dos indivíduos obtidos corresponde a um conjunto admissível de rotas, são ainda percorridos aleatoriamente todos os pedidos que não estão a ser satisfeitos por nenhum dos veículos, procurando-se aumentar o número de pedidos satisfeitos. Para cada pedido, identificam-se todas as formas admissíveis de os incluir em alguma das rotas, e opta-se pela que corresponder a um menor incremento na distância total percorrida.

Cada indivíduo obtido será posteriormente avaliado, com base nas duas funções objetivo consideradas. Dado um indivíduo s , correspondendo a uma solução em que são satisfeitos x locais, e em que é percorrida uma distância total, não nula, y , o valor de *fitness* é dado por

$$f(s) = x + \sqrt[10]{\frac{1}{y}}$$

Com a função selecionada pretende-se que em soluções em que se satisfaz o mesmo número de pedidos se obtenham valores próximos, mas mais elevados nos casos em que a distância total percorrida for inferior. Querendo também evitar-se que uma solução com menos pedidos satisfeitos possa ter melhor valor *fitness* do que outra com mais pedidos satisfeitos, introduziu-se uma componente associada à distância com forte tendência para ter valores inferiores a 1, para as instâncias consideradas.

Note-se que, apesar de na codificação considerada não ser explicitado o regresso ao armazém, ele é considerado para o cálculo da distância. Na eventualidade da distância associada a uma solução ser nula, o valor *fitness* corresponderá apenas ao número de locais visitados.

Nesta fase, cada uma das soluções identificadas será comparada com o histórico de soluções obtidas até esse momento em que se registaram melhores valores objetivo. Caso a solução identificada registre valores melhores do que alguma das soluções em histórico, e não seja igual a nenhuma delas, ficará registada a nova solução, juntamente com o número de pedidos que permite satisfazer e com a distância total percorrida, removendo-se a pior das soluções que se encontravam no histórico.

O valor de *fitness* obtido para determinado indivíduo, ficará associado a cada uma das componentes, ou indivíduos de subpopulações, que se usaram para a construção desse indivíduo. Ao ficar terminada a geração e avaliação de todos os indivíduos, é determinada, para cada uma das componentes, a média dos valores de *fitness* obtidos pelos indivíduos que a continham. Com isto, pretende-se que os indivíduos de subpopulações que permitem obter melhores soluções, tenham maior probabilidade de serem usadas na obtenção das gerações posteriores.

7.3.4 Operações

Nesta etapa são consideradas as subpopulações. Primeiro, são usados os valores de *fitness* para se atribuírem probabilidades a cada um dos indivíduos da subpopulação considerada, sendo essas probabilidades proporcionais aos valores de

fitness, e com soma igual a um. Mais propriamente, dada uma subpopulação que consista em d indivíduos, com valores de *fitness* f_1, f_2, \dots, f_d , a probabilidade associada ao j -ésimo indivíduo ($1 \leq j \leq k$) será dada por

$$p_j = f_j / \sum_{i=1}^k f_i$$

Recorrendo às probabilidades obtidas, serão selecionados $k/2$ pares de indivíduos, que correspondem a pares de progenitores. Cada par de progenitores será sujeito às operações, após as quais se irá obter um par de descendentes. O conjunto de $k/2$ pares de descendentes obtidos irá corresponder à geração seguinte.

A primeira operação aplicada é um cruzamento. Não existe a garantia de que os progenitores têm o mesmo número de valores não nulos, isto é, eles poderão corresponder a rotas com diferentes números de locais visitados, o que provoca limitações relativamente ao cruzamento a efetuar. Face a essa discrepância, opta-se por excluir de ambos os progenitores qualquer visita que não seja obrigatória. Dado que ambos os progenitores pertencem à mesma subpopulação, eles partilham o mesmo conjunto de locais de visita obrigatória, pelo que após as remoções indicadas se obtêm indivíduos com o mesmo número de valores não nulos, podendo esses valores estar ordenados de formas distintas nos dois progenitores. Refira-se ainda que ficam registados os pedidos que foram excluídos do par de progenitores, podendo esse registo vir a ser utilizado posteriormente.

Para cada par de indivíduos obtidos, compostos exclusivamente pelas visitas obrigatórias, será aplicada a operação cruzamento com uma probabilidade previamente definida. Recorreu-se a um cruzamento PMX (*Partially Mapped Crossover*), cujo funcionamento é ilustrado na Figura 28. Nesta operação são definidos dois pontos de cruzamento e, para cada descendente, há um dos progenitores que contribui com um conjunto de locais com visitas consecutivas cuja ordem se mantém, e a ordem das restantes visitas é obtida a partir do outro progenitor, podendo ocorrer alterações nessas ordens. A ordem da posição atual nunca será alterada.

No exemplo da Figura 28, são representados dois progenitores, nos quais já se removeram quaisquer visitas opcionais, e que portanto têm o mesmo número de visitas. São definidos como pontos de cruzamento a 3ª e 4ª visita, que dão origem a um conjunto de correspondências ou trocas associadas ao cruzamento. Todas as visitas entre os pontos de cruzamento ficam então definidas para os descendentes D1 e D2 (1º preenchimento), correspondendo às visitas dos progenitores P2 e P1, respetivamente. É também preenchido a primeira visita que corresponde à posição

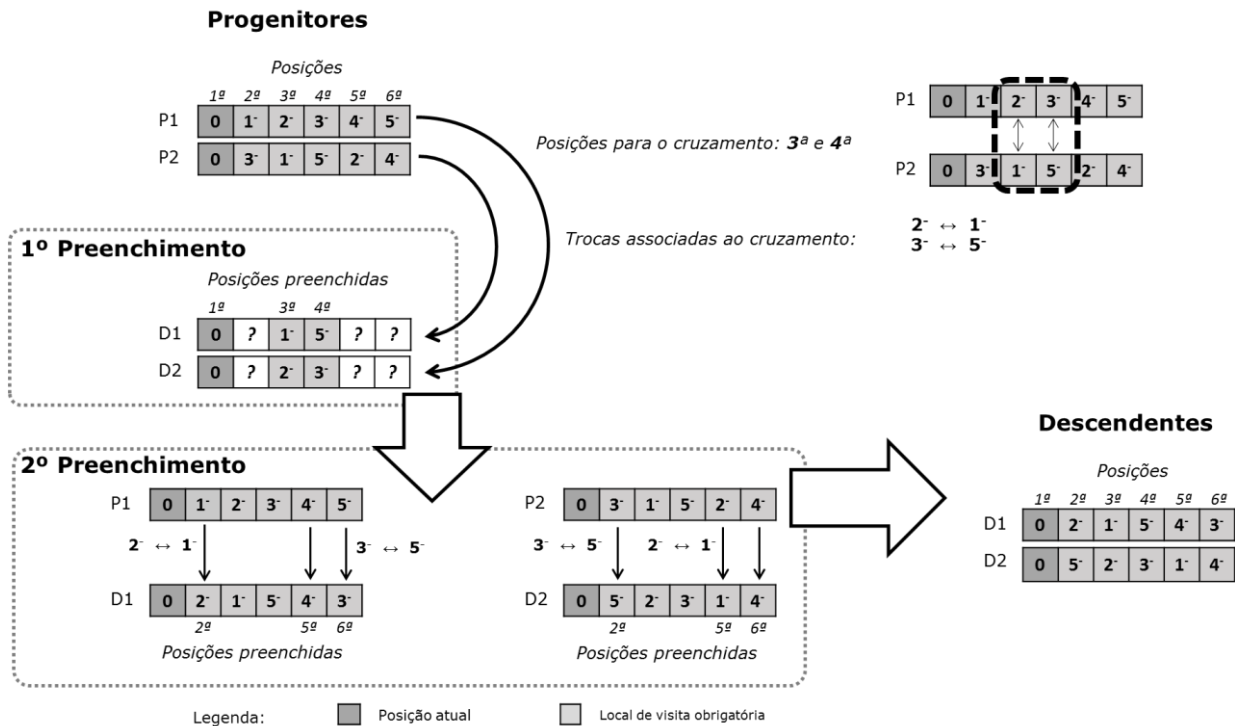


Figura 28 - Cruzamento PMX

atual do veículo. Depois, são definidas as restantes visitas, usando-se o conjunto de trocas obtidas (2º Preenchimento).

Dado que apenas se estão a considerar locais obrigatórios, nas rotas definidas pelos indivíduos obtidos após o cruzamento não se estará a exceder a capacidade do veículo, uma vez que todos os locais além do primeiro são de descarga, e que o primeiro local corresponde à posição atual, em que só se poderá verificar um excesso de carga se tiver sido definida uma rota não admissível numa decisão anterior. As restrições de precedência também não serão quebradas, uma vez que o único local de carga considerado precede todos os locais de descarga. No entanto, as rotas obtidas poderão não ser admissíveis por não se respeitarem as janelas temporais associadas aos locais de descarga. Note-se que, apesar de um indivíduo não definir instantes de visita da rota associada, ao definir um conjunto de locais a visitar e as respetivas ordens de visita, ficam implicitamente definidos limites inferiores para cada instante de visita. Assim, caso não se esteja a respeitar uma determinada janela temporal, isso ocorrerá porque o limite inferior para o instante dessa visita é superior ao limite superior dessa janela temporal.

Caso algum dos indivíduos não seja admissível, poderá ser aplicada uma operação de mutação, com determinada probabilidade associada. Nessa operação é identificada a primeira visita que não ocorre dentro da respetiva janela temporal, e a essa visita é antecipada até que possa ocorrer dentro da respetiva janela, obtendo-se um novo indivíduo. O processo repete-se até que seja identificada uma rota

admissível, ou até que se identifique que o local a que corresponde a primeira visita não admissível já foi antecipado numa iteração anterior. No segundo caso, não se irá obter um indivíduo admissível.

Se algum dos indivíduos obtidos não for admissível, recorre-se a um dos indivíduos que foram obtidos a partir dos progenitores após a remoção das visitas a locais opcionais, e que correspondem necessariamente a rotas admissíveis. Apesar do par de indivíduos obtidos ser admissível, apenas consideram visitas a locais obrigatórios.

Posteriormente, é aplicada uma segunda operação de mutação a cada um dos indivíduos, em que se procura realizar inserções de locais opcionais. São considerados dois conjuntos de pedidos opcionais, sendo um deles composto pelos pedidos que foram removidos dos progenitores, e o outro constituído pelos restantes pedidos considerados na instância, que não sejam incompatíveis com o veículo a que a subpopulação está associada.

Para cada indivíduo, apenas são inseridos pedidos de um dos conjuntos. Esta operação também tem uma probabilidade associada, mas que está associada ao conjunto de pedidos que será considerado na operação, e não à realização da operação. Após ficar definido o conjunto de pedidos, eles são ordenados aleatoriamente, e procede-se a tentativas de inserção de cada pedido de acordo com a ordem obtida. Aqui recorre-se à heurística de inserção já descrita neste capítulo, permitindo-se inserções em qualquer posição.

Após a realização deste conjunto de operações para todos os pares de indivíduos, é obtido, para cada uma das subpopulações, um conjunto de descendentes que corresponde à geração seguinte.

7.4 Caracterização dos Algoritmos

Em seguida é caracterizado cada um dos nove algoritmos usados. Consideram-se três grupos de algoritmos. No primeiro estão incluídos os que usam a heurística de inserção, no segundo grupo considera-se o recurso ao Algoritmo Genético sem cenários previsionais, e no último grupo incluem-se os algoritmos que usam o Algoritmo Genético com inclusão de cenários previsionais para seleção das rotas a executar.

Pode verificar-se que para cada algoritmo considerado existe um outro que apenas difere na abordagem às folgas, com exceção do primeiro algoritmo apresentado que corresponde a inserções no fim das rotas. Isto sucede porque no caso desse primeiro algoritmo a escolha de um desses critérios é irrelevante, uma

vez que inserir no final de uma rota corresponde a inserir entre uma última visita e o regresso ao armazém, onde nunca existem folgas dado que o armazém não tem uma janela temporal associada.

Heurística de Inserção

- **H1** – Apenas são aplicadas Inserções no Fim.
- **H2_CE** – Aplicadas Inserções Livres, e usado critério Com Espera.
- **H2_SE** – Aplicadas Inserções Livres, e usado critério Sem Espera.

Algoritmo Genético

- **GA1_CE** – Usado critério Com Espera.
- **GA1_SE** – Usado critério Sem Espera.

Algoritmo Genético com Cenários Previsionais

- **GA2_CE_MP** – Usado critério Com Espera para abordagem às folgas, e critério Melhor Pior Caso para avaliar soluções.
- **GA2_SE_MP** – Usado critério Sem Espera para abordagem às folgas, e critério Melhor Pior Caso para avaliar soluções.
- **GA2_CE_DM** – Usado critério Com Espera para abordagem às folgas, e critério Desempenho Médio para avaliar soluções.
- **GA2_SE_DM** – Usado critério Sem Espera para abordagem às folgas, e critério Desempenho Médio para avaliar soluções.

Parte III – Resultados

- 8. Análise de Resultados
- 9. Conclusões

8. Análise de Resultados

Os algoritmos foram executados para as dez instâncias caracterizadas no Capítulo 6, com recurso ao *software* MATLAB, versão R2105a. São apresentados os resultados obtidos num computador com processador Intel Core 2 Duo 2.93 GHz, e 4 GB de memória RAM. No caso dos algoritmos que usam o Algoritmo Genético, e uma vez que este tem uma componente aleatória, foram feitas 20 execuções para cada instância, sendo apresentados valores médios (colunas 1 a 4), bem como a pior e a melhor das soluções obtidas.

Em todas as execuções de algoritmos que usam o Algoritmo Genético, foi considerado como critério de paragem o serem atingidos cinco segundos de execução. Realça-se que este critério é para cada decisão, ou instância estática, registando-se tempos superiores para a instância dinâmica. A heurística de inserção corre em poucos segundos, mesmo nas instâncias (dinâmicas) com maior número de pedidos.

Em cada uma das instâncias é indicado o número total de pedidos considerados. Nas instâncias 5 a 10, todos os valores apresentados são referentes apenas ao 2º período, incluindo o número total de pedidos. Para as instâncias 8', 9' e 10' são apresentados valores ótimos referentes ao 2º período.

8.1 Instâncias 1 a 4

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos para a instância 1. Nesta instância obtiveram-se soluções significativamente melhores quando se recorreu ao Algoritmo Genético. Os piores resultados obtidos nesses seis algoritmos correspondem a um número de pedidos satisfeitos entre 32 e 36, enquanto ambos os algoritmos **H2** registam 31 pedidos satisfeitos, e o algoritmo **H1** regista apenas 25.

Instância 1

Total de Pedidos: 56

Algoritmo				<i>Pior caso</i>			<i>Melhor caso</i>		
	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	25	44,64%	22986	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	31	55,36%	22918	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	31	55,36%	25684	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	33,95	60,63%	23504	33	58,93%	23434	34	60,71%	23508
GA1_SE	36,00	64,29%	26821	36	64,29%	26821	36	64,29%	26821
GA2_CE_MP	34,75	62,05%	26289	32	57,14%	24500	37	66,07%	27199
GA2_SE_MP	35,20	62,86%	27119	33	58,93%	24274	36	64,29%	26173
GA2_CE_DM	36,20	64,64%	27950	34	60,71%	25395	38	67,86%	27599
GA2_SE_DM	35,55	63,48%	28090	34	60,71%	27555	37	66,07%	29804

Tabela 6 - Resultados obtidos para a Instância 1

Em relação à abordagem a folgas, com o critério 'Sem Espera' houve tendência para que fossem satisfeitos mais pedidos nas heurísticas **GA**, com exceção das que usam cenários previsionais com critério de seleção 'Desempenho Médio'. Nas heurísticas **H2** o critério 'Sem Espera' levou a uma menor distância total.

O número de pedidos satisfeitos ao usar o critério de seleção 'Desempenho Médio' tende a ser superior ao que se verifica com o critério 'Melhor Pior Caso'. Em particular, o algoritmo **GA2_CE_DM** corresponde ao maior número de pedidos satisfeitos, quer em termos médios, quer no melhor caso.

É também de realçar a pouca variabilidade entre os resultados obtidos pelas heurísticas **GA1**. Pode verificar-se que na variante 'Sem Espera', **GA1_SE**, os 20 resultados obtidos coincidem. No algoritmo **GA1_CE**, obtiveram-se os mesmos valores em 19 das 20 execuções, que correspondem aos do melhor caso para esse algoritmo.

Instância 2

Total de Pedidos:

72

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	<i>Pior caso</i>			<i>Melhor caso</i>		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	27	37,50%	32467	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	39	54,17%	34536	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	39	54,17%	34569	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	44,00	61,11%	34954	44	61,11%	34955	44	61,11%	34954
GA1_SE	43,00	59,72%	36287	43	59,72%	36287	43	59,72%	36287
GA2_CE_MP	41,05	57,01%	34824	38	52,78%	34972	45	62,50%	35093
GA2_SE_MP	41,35	57,43%	35616	39	54,17%	35980	46	63,89%	36673
GA2_CE_DM	40,45	56,18%	35469	37	51,39%	36031	44	61,11%	36081
GA2_SE_DM	41,90	58,19%	36974	39	54,17%	37774	44	61,11%	36525

Tabela 7 - Resultados obtidos para a Instância 2

Nos resultados apresentados na Tabela 7, referentes à instância 2, também se verifica um melhor desempenho quando se recorreu ao Algoritmo Genético.

Novamente, há pouca variabilidade nos resultados dos algoritmos **GA1**. Para esta instância, obtiveram-se sempre os mesmos valores para o algoritmo **GA1_SE**, e para o algoritmo **GA1_CE** estão presentes apenas dois pares de valores, que coincidem em número de pedidos satisfeitos, e com uma diferença na distância percorrida inferior a 1.

Ao contrário do que se verificou na primeira instância, na instância 2 a incorporação da componente previsional aparenta ter um impacto negativo, tendo levado a menos pedidos satisfeitos, em termos médios, apesar dos melhores resultados obtidos corresponderem aos algoritmos **GA2_CE_MP** e **GA2_SE_MP**. Nos algoritmos em que se recorre ao critério 'Desempenho Médio' os resultados obtidos são significativamente piores do que os registados pela heurística **GA1**, não se tendo obtido nenhum resultado, através desse critério, com mais pedidos satisfeitos do que os verificados para a heurística **GA1_CE**. Os resultados piores obtidos com a componente previsional são inclusivamente inferiores aos obtidos através da heurística **H2**, registando-se para os algoritmos com cenários previsionais e com critério 'Com Espera' menos pedidos satisfeitos do que os verificados para os algoritmos **H2**, enquanto os que recorrem ao critério 'Sem Espera' verificam o mesmo número de pedidos satisfeitos, mas maiores distâncias percorridas.

Ao contrário do que acontecia para a instância anterior, na parametrização da instância 2 não foram usadas zonas de concentração, pelo que haverá tendência para haver menor proximidade entre os locais de carga e descarga de pedidos previstos e os que efetivamente vêm a ser considerados, o que fará com que as opções tomadas pela componente previsional tenham levado a piores resultados.

8. Análise de Resultados

O número de pedidos considerados na instância 1 está próximo do verificado na instância 3, mas enquanto na primeira o melhor resultado correspondia a satisfazer cerca de 68% dos pedidos, no pior resultado obtido para a instância 3 são satisfeitos cerca de 86% dos pedidos, como se pode verificar na Tabela 8. Considera-se que as diferentes localizações para a sede e a tendência para, na instância 3, os pedidos serem conhecidos com maior antecedência, terão contribuído para essa disparidade.

Instância 3

Total de Pedidos:

57

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Pior caso			Melhor caso		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	49	85,96%	47076	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	49	85,96%	43220	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	49	85,96%	43220	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	51,60	90,53%	43650	51	89,47%	43275	52	91,23%	43561
GA1_SE	51,80	90,88%	44069	51	89,47%	43525	52	91,23%	44050
GA2_CE_MP	50,60	88,77%	43015	50	87,72%	43176	52	91,23%	44625
GA2_SE_MP	50,90	89,30%	43681	50	87,72%	44110	52	91,23%	44007
GA2_CE_DM	50,15	87,98%	43367	50	87,72%	44602	51	89,47%	43324
GA2_SE_DM	50,05	87,81%	44180	49	85,96%	44056	51	89,47%	43917

Tabela 8 - Resultados obtidos para a Instância 3

Os algoritmos **GA** conduziram a resultados melhores do que as heurísticas de inserção, apesar de dois dos 20 resultados obtidos para o algoritmo **GA2_SE_DM** serem piores do que os dos algoritmos **H2** por corresponderem a maior distância percorrida.

Nesta instância, e à semelhança do que se verificou na instância 2, a incorporação das previsões levaram a resultados tendencialmente inferiores. Note-se que no caso das instâncias 3 e 4, e ao contrário das anteriores, não são consideradas zonas de concentração para a distribuição dos locais de carga ou descarga, o que tenderá a provocar maiores disparidades entre os locais de carga e descarga obtidos pela previsão, e os que efetivamente vêm a ser considerados.

Os resultados apresentados na Tabela 9 não sugerem que na instância 4 tenha havido diferenças de desempenho significativas entre os algoritmos **GA1** e os que incorporam a componente previsional. No entanto, no segundo conjunto, o recurso ao critério 'Sem Espera' levou a melhores resultados.

Analogamente ao que se referiu para a instância 3, mas agora comparando os resultados da Tabela 9 com os que se tinham obtido para a instância 2, ocorrem novamente maiores percentagens de pedidos satisfeitos, apesar do número total de pedidos registados nessas instâncias estar próximo.

Instância 4

Total de Pedidos: 70

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	<i>Pior caso</i>			<i>Melhor caso</i>		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	47	67,14%	48284	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	50	71,43%	47716	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	50	71,43%	47717	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	53,05	75,79%	48191	53	75,71%	48359	54	77,14%	49713
GA1_SE	53,05	75,79%	48229	53	75,71%	48588	54	77,14%	49249
GA2_CE_MP	53,00	75,71%	48879	51	72,86%	46200	54	77,14%	49717
GA2_SE_MP	53,40	76,29%	49730	52	74,29%	48531	54	77,14%	50071
GA2_CE_DM	52,80	75,43%	50240	51	72,86%	48410	54	77,14%	50410
GA2_SE_DM	53,40	76,29%	51063	52	74,29%	51704	54	77,14%	50708

Tabela 9 - Resultados obtidos para a Instância 4

Numa análise conjunta às instâncias 1 e 2, não aparenta existir um critério de seleção de soluções que tenha levado a resultados manifestamente melhores. No entanto, nas instâncias 3 e 4, o critério 'Melhor Pior Caso' obteve um melhor desempenho. Considera-se que isso poderá estar relacionado com a não inclusão de zonas de concentração no segundo conjunto de instâncias, levando a menor qualidade nas previsões, o que terá tido menos impacto ao usar-se o critério 'Melhor Pior Caso' do que com o critério 'Desempenho Médio'

8.2 Instâncias 5 a 7

Para este conjunto de instâncias, os valores apresentados dizem respeito apenas ao período 2. Mais propriamente, o número de pedidos considerados foi obtido subtraindo, ao número total de pedidos, todos os pedidos que no instante referido já tivessem sido satisfeitos, parcial ou integralmente, ou que já tivessem sido

Instância 5

Nº Pedidos Considerados 10

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	<i>Pior caso</i>			<i>Melhor caso</i>		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	8	80,00%	11839	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	9	90,00%	11887	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	9	90,00%	11892	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	9,00	90,00%	10807	9	90,00%	10807	9	90,00%	10807
GA1_SE	9,00	90,00%	10811	9	90,00%	10811	9	90,00%	10811
GA2_CE_MP	9,85	98,50%	13553	9	90,00%	12729	10	100,00%	13042
GA2_SE_MP	9,50	95,00%	12442	8	80,00%	11538	10	100,00%	12048
GA2_CE_DM	9,80	98,00%	13909	9	90,00%	12904	10	100,00%	13171
GA2_SE_DM	9,95	99,50%	14069	9	90,00%	14123	10	100,00%	13171

Tabela 10 - Resultados obtidos para a Instância 5

analisados mas não tivessem sido incluídos em nenhuma rota. De outra perspectiva, no número de pedidos considerados são contemplados todos os pedidos que só são conhecidos no período 2, e os que, tendo sido conhecidos no período 1, foram incluídos em alguma das rotas sem que se tenha realizado alguma das visitas aos locais associados. Em relação aos valores apresentados para a distância, apenas se estão a considerar os movimentos que ocorreram após a execução da primeira das decisões associadas ao 2º período.

Na instância 5, verificaram-se melhores resultados ao executar os algoritmos **GA**, em particular nos que recorrem a cenários previsionais. Com os algoritmos **GA1** o número de pedidos satisfeitos coincide com os valores obtidos para os algoritmos **H2**, mas sendo percorridas distâncias inferiores. Para cada um dos algoritmos **GA2** são satisfeitos os dez pedidos na maioria das 20 execuções realizadas, sendo que na utilização do critério de seleção 'Melhor Pior Caso' houve tendência para se obterem menores distâncias percorridas do que com o critério 'Desempenho Médio', enquanto o segundo levou a valores tendencialmente superiores em termos de número de pedidos satisfeitos.

Novamente, não se identifica tendência para melhores resultados em algum dos critérios de abordagem a folgas. Nos algoritmos **GA1** o número de pedidos satisfeitos coincide, e as distâncias percorridas são muito próximas. Nos algoritmos **GA2** com critério de seleção 'Melhor Pior Caso', é com o critério 'Com Espera' que se registam melhores resultados, mas com o critério 'Desempenho Médio' acontece o oposto.

Analogamente ao verificado noutras instâncias, na instância 5 cada um dos algoritmos **GA1** levou ao mesmo resultado nas 20 execuções. Na instância 6, cujos resultados são apresentados na Tabela 11, também se obteve o mesmo resultado nas várias execuções do algoritmo **GA1_SE**, enquanto o algoritmo **GA1_CE** levou aos resultados do pior caso em 17 execuções, e aos do melhor caso nas restantes três.

Na instância 6, os algoritmos **GA2** tiveram melhor desempenho que os restantes. Os algoritmos **GA1** apenas permitiram satisfazer seis pedidos, com exceção de três das execuções do algoritmo **GA1_CE** em que são satisfeitos os mesmos sete pedidos que com o algoritmo **H1**, mas com distâncias percorridas significativamente inferiores. Os algoritmos **H2** permitiram satisfazer mais pedidos do que em todas as execuções dos algoritmos **GA1**, e do que na maior parte das execuções dos algoritmos com critério de seleção 'Melhor Pior Caso', **GA2_CE_MP** e **GA2_SE_MP**.

Instância 6

Nº Pedidos Considerados

10

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	<i>Pior caso</i>			<i>Melhor caso</i>		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	7	70,00%	12033	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	8	80,00%	10156	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	8	80,00%	10239	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	6,15	61,50%	8322	6	60,00%	8146	7	70,00%	9323
GA1_SE	6,00	60,00%	8229	6	60,00%	8229	6	60,00%	8229
GA2_CE_MP	7,70	77,00%	10962	6	60,00%	9599	9	90,00%	13457
GA2_SE_MP	7,50	75,00%	10685	6	60,00%	9682	9	90,00%	12347
GA2_CE_DM	8,35	83,50%	12282	7	70,00%	10245	9	90,00%	13129
GA2_SE_DM	8,20	82,00%	11864	7	70,00%	10328	9	90,00%	12347

Tabela 11 - Resultados obtidos para a Instância 6

À semelhança do que se verificou na instância 5, na instância 6 com o critério 'Desempenho Médio' tendem a ser satisfeitos mais pedidos. No entanto, na segunda instância referida a diferença aparente entre os dois critérios de seleção de soluções é superior, o que poderá resultar da não inclusão de zonas de concentração na primeira instância.

Na instância 7 foi possível satisfazer os seis pedidos considerados em todas as execuções, de acordo com a Tabela 12. Relativamente a distâncias percorridas, os resultados dos algoritmos **GA** correspondem a menores distâncias do que as verificadas nas heurísticas de inserção. Os algoritmos **GA1** levaram aos melhores resultados registados, e que correspondem aos melhores casos para os algoritmos com componente previsual.

Instância 7

Nº Pedidos Considerados

6

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	<i>Pior caso</i>			<i>Melhor caso</i>		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	6	100,00%	8112	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	6	100,00%	8112	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	6	100,00%	8112	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	6,00	100,00%	7980	6	100,00%	7980	6	100,00%	7980
GA1_SE	6,00	100,00%	7980	6	100,00%	7980	6	100,00%	7980
GA2_CE_MP	6,00	100,00%	8013	6	100,00%	8114	6	100,00%	7980
GA2_SE_MP	6,00	100,00%	8090	6	100,00%	8673	6	100,00%	7980
GA2_CE_DM	6,00	100,00%	8200	6	100,00%	8620	6	100,00%	7980
GA2_SE_DM	6,00	100,00%	8136	6	100,00%	8538	6	100,00%	7980

Tabela 12 - Resultados obtidos para a Instância 7

8.3 Instâncias 8 a 10

No último conjunto de instâncias considerado, não foram contemplados tempos de serviço, e foi usado um método exato em que, como referido no Capítulo 6, se considera o mesmo instante de colocação para todos os pedidos. Esse instante irá coincidir com o instante de colocação do primeiro dos pedidos considerados no período 2. As instâncias 8, 9 e 10, com a modificação referida, são designadas por instâncias 8', 9' e 10', respectivamente.

Uma vez que nas instâncias 8', 9' e 10' existe antecipação de informação, será expectável que ao executar cada um dos algoritmos nas instâncias 8, 9 e 10, não se obtenham as soluções fornecidas pelo método exato. Assim, e procurando perceber se as diferenças entre esses resultados são provocadas pelo desempenho dos algoritmos, ou se podem ser atribuídas à diferença entre as instâncias, foram também realizadas execuções de todos os algoritmos para as instâncias 8', 9' e 10', sendo apresentados os respetivos resultados obtidos. Realça-se que não se englobam todos os pedidos considerados numa decisão única. As decisões que estavam contempladas são as mesmas, mas tomadas no mesmo instante, continuando a usar-se o atingir cinco segundos como critério de paragem nos casos em que se recorre ao Algoritmo Genético.

Além da apresentação dos resultados, como efetuado para as instâncias anteriores 5 a 7, são também apresentados as distâncias obtidas pelo método exato para números de pedidos satisfeitos fixos considerados relevantes para análise dos resultados obtidos através das heurísticas.

Considerou-se que poderia não haver benefício em executar os algoritmos com cenários previsionais para as instâncias 8', 9' e 10', devido à manipulação que se está a fazer para se obter este conjunto de instâncias. Inclusivamente, uma vez que o conjunto de decisões finais estão a ocorrer no mesmo instante, apenas a última das decisões será efetivamente executada.

Em qualquer dos algoritmos **GA**, para uma mesma instância estática e sendo usada a mesma semente, o conjunto de soluções obtidas irá coincidir. O que distingue estes algoritmos ocorre depois da obtenção desse conjunto, ao ser selecionada a solução que será executada, e na forma como ela será executada. Por sua vez, essas opções associadas à execução vão afetar a caracterização da instância estática imediatamente posterior.

No entanto, se duas decisões estiverem agregadas, como ocorre nas instâncias 8', 9' e 10', não se irá iniciar a execução associada à primeira, pelo que a componente previsual, bem como o critério de abordagem a folgas, só irão ter impacto na

segunda decisão. Mais geralmente, havendo N decisões nessas circunstâncias, não se irá iniciar qualquer das rotas obtidas nas primeiras $N-1$ decisões, e os fatores referidos só terão impacto na N -ésima decisão.

Por outro lado, após a última decisão associada a cada uma das instâncias 8', 9' e 10', não irão surgir mais pedidos, pelo que a melhor solução das soluções do conjunto obtido nessa última decisão será efetivamente a melhor opção para o meta-problema. Assim, o que a execução dos algoritmos **GA2** poderá permitir é uma análise de desempenho na ocorrência de períodos prolongados sem pedidos novos, que se considerou poder ser relevante, sendo portanto apresentados os resultados obtidos com esse conjunto de algoritmos, para as instâncias referidas.

No caso dos algoritmos **H2** e **GA1**, em que não existe a componente previsional, o que acima se referiu faz com que os resultados obtidos com cada um dos critérios de abordagem a folgas coincidam, desde que, no caso dos algoritmos **GA1**, seja usada a mesma semente para geração de valores pseudoaleatórios.

Na Tabela 13 apresentam-se os resultados associados à instância 8. Em todas as execuções realizadas foram obtidas soluções em que se satisfazem três de cinco pedidos. Nas heurísticas de inserção obteve-se uma distância percorrida de 5013 unidades, tendo sido registado esse mesmo valor em todas as execuções dos algoritmos **GA1_CE** e **GA1_SE**.

Instância 8

Nº Pedidos Considerados

5

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Pior caso			Melhor caso		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	3	60,00%	5013	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	3	60,00%	5013	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	3	60,00%	5013	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	3,00	60,00%	5013	3	60,00%	5013	3	60,00%	5013
GA1_SE	3,00	60,00%	5013	3	60,00%	5013	3	60,00%	5013
GA2_CE_MP	3,00	60,00%	5396	3	60,00%	5588	3	60,00%	5013
GA2_SE_MP	3,00	60,00%	5536	3	60,00%	5742	3	60,00%	5013
GA2_CE_DM	3,00	60,00%	5667	3	60,00%	6147	3	60,00%	5366
GA2_SE_DM	3,00	60,00%	5863	3	60,00%	6309	3	60,00%	5644

Tabela 13 - Resultados obtidos para a Instância 8

Em relação aos algoritmos que incorporam cenários previsionais, o critério 'Melhor Pior Caso' permitiu identificar a mesma distância de 5013 unidades em duas e três das 20 execuções, para o algoritmo **GA2_CE_MP** e o algoritmo **GA2_SE_MP**, respetivamente, obtendo-se distâncias superiores nas restantes execuções desses algoritmos. Com o critério 'Desempenho Médio' obtiveram-se sempre distâncias

8. Análise de Resultados

superiores a 5013, e os dois algoritmos em que se usa esse critério levaram aos piores resultados obtidos.

Nesta instância, o critério de abordagem a folgas 'Sem Espera' levou a resultados globalmente piores do que o critério 'Com Espera' nos algoritmos **GA2**, sendo que nos algoritmos **GA1** ambos os critérios conduziram aos mesmos resultados.

Na Tabela 14 é apresentada a solução ótima para a instância 8', em que são satisfeitos quatro pedidos. Também é indicada a distância ótima caso se satisfaçam três pedidos.

Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
4	80,00%	5835
3	60,00%	4405

Tabela 14 - Soluções ótimas para a Instância 8'

Nenhum dos algoritmos permitiu satisfazer quatro pedidos na instância 8, no entanto, ao considerar a instância 8' isso foi alcançado em todas as execuções, como se pode verificar na Tabela 15.

Instância 8'

Nº Pedidos Considerados

5

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	<i>Pior caso</i>			<i>Melhor caso</i>		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	4	80,00%	7088	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	4	80,00%	6316	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	4	80,00%	6316	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	4,00	80,00%	5835	4	80,00%	5835	4	80,00%	5835
GA1_SE	4,00	80,00%	5835	4	80,00%	5835	4	80,00%	5835
GA2_CE_MP	4,00	80,00%	5835	4	80,00%	5835	4	80,00%	5835
GA2_SE_MP	4,00	80,00%	5835	4	80,00%	5835	4	80,00%	5835
GA2_CE_DM	4,00	80,00%	5929	4	80,00%	6213	4	80,00%	5835
GA2_SE_DM	4,00	80,00%	5948	4	80,00%	6213	4	80,00%	5835

Tabela 15 - Resultados obtidos para a Instância 8'

Nesta instância, que se obteve após a antecipação de pedidos, foi identificada a solução ótima pelos vários algoritmos que recorrem ao Algoritmo Genético. Isso sucedeu em todas as execuções dos algoritmos **GA1**, e dos algoritmos **GA2** que recorrem ao critério 'Melhor Pior Caso'.

Para cada um dos algoritmos **GA2** em que se considera o critério 'Desempenho Médio', a solução ótima foi identificada na maioria das execuções. Apesar de isso não

ter ocorrido em todas as execuções, os resultados obtidos são melhores do que os verificados pelo recurso às heurísticas de inserção.

Para a instância 9 existem 13 pedidos conhecidos no 2º período. Como se pode verificar na Tabela 16, o algoritmo **H1** levou a apenas cinco pedidos satisfeitos, enquanto o **H2** permitiu satisfazer dez pedidos.

Ao contrário do que se verificou para a instância 8, na instância 9 o critério de seleção de rotas 'Desempenho Médio' apresenta melhores valores globais, apesar de nos piores casos se registarem maiores distâncias percorridas. Esta diferença entre as duas instâncias poderá estar relacionada com a inclusão de zonas de concentração na instância 9, mas não na instância 8, à semelhança do que se tinha verificado para as instâncias 5 e 6.

Instância 9

Nº Pedidos Considerados

13

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Pior caso			Melhor caso		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	5	38,46%	12823	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	10	76,92%	16437	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	10	76,92%	15161	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	9,70	74,62%	15330	9	69,23%	14514	10	76,92%	15684
GA1_SE	9,65	74,23%	15537	9	69,23%	14619	10	76,92%	16025
GA2_CE_MP	9,65	74,23%	15674	9	69,23%	15220	10	76,92%	15684
GA2_SE_MP	9,65	74,23%	15988	9	69,23%	15812	11	84,62%	17128
GA2_CE_DM	9,80	75,38%	16452	9	69,23%	15983	11	84,62%	17260
GA2_SE_DM	9,75	75,00%	16677	9	69,23%	17043	11	84,62%	17311

Tabela 16 - Resultados obtidos para a Instância 9

O número de pedidos satisfeitos nas melhores soluções obtidas está próximo do valor ótimo para o problema 8', de acordo com a Tabela 17 em que se indicam distâncias ótimas para números de pedidos satisfeitos fixados.

Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
12	92,31%	15994
11	84,62%	14122
10	76,92%	12628
9	69,23%	11261
8	61,54%	10109
7	53,85%	9385
6	46,15%	8678
5	38,46%	7954

Tabela 17 - Soluções ótimas para a Instância 9'

8. Análise de Resultados

Ao correr os algoritmos para a instância 9', foram satisfeitos os 12 pedidos em todas as execuções dos algoritmos **GA**, com exceção da uma das execuções do algoritmo **GA2_SE_DM**, de acordo com a Tabela 18.

Para esta instância não foi obtida a solução ótima, nem a distância ótima estando fixado o número de pedidos inferior a 12. À semelhança do que se verificou na instância 8', nos algoritmos com cenarização o recurso ao critério 'Desempenho Médio' tendeu a conduzir a maiores distâncias percorridas.

Instância 9'

Nº Pedidos Considerados

13

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Pior caso			Melhor caso		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	6	46,15%	13204	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	10	76,92%	15015	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	10	76,92%	15015	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	12,00	92,31%	16699	12	92,31%	17325	12	92,31%	16338
GA1_SE	12,00	92,31%	16670	12	92,31%	17284	12	92,31%	16338
GA2_CE_MP	12,00	92,31%	16933	12	92,31%	17840	12	92,31%	16338
GA2_SE_MP	12,00	92,31%	16944	12	92,31%	17741	12	92,31%	16338
GA2_CE_DM	12,00	92,31%	17124	12	92,31%	18241	12	92,31%	16338
GA2_SE_DM	11,95	91,92%	17042	11	84,62%	15343	12	92,31%	16432

Tabela 18 - Resultados obtidos para a Instância 9'

Como se referiu no Capítulo 6, a instância 10 recorre às zonas de concentração, em menor número e com maiores probabilidades associadas. Os resultados para essa instância são apresentados na Tabela 19.

Instância 10

Nº Pedidos Considerados

8

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Pior caso			Melhor caso		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	6	75,00%	7428	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	8	100,00%	4136	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	8	100,00%	4183	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	8,00	100,00%	4120	8	100,00%	4120	8	100,00%	4120
GA1_SE	8,00	100,00%	4168	8	100,00%	4168	8	100,00%	4168
GA2_CE_MP	7,90	98,75%	4699	7	87,50%	4667	8	100,00%	4117
GA2_SE_MP	8,00	100,00%	4637	8	100,00%	6717	8	100,00%	4168
GA2_CE_DM	7,65	95,63%	6308	7	87,50%	6388	8	100,00%	5484
GA2_SE_DM	8,00	100,00%	6598	8	100,00%	8167	8	100,00%	5464

Tabela 19 - Resultados obtidos para a Instância 10

Não existe uma diferença significativa entre critérios de seleção de soluções no que diz respeito ao número de pedidos satisfeitos. No entanto, o critério

'Desempenho Médio' foi o que levou a distâncias percorridas superiores. Os melhores resultados verificados para esta instância correspondem aos algoritmos **GA1** e **GA2** com critério 'Melhor Pior Caso', no entanto os algoritmos **H2** registaram distâncias percorridas muito próximas, para o mesmo número de pedidos satisfeitos, superando o desempenho global dos algoritmos **GA2**.

Na instância 10' podem ser satisfeitos oito pedidos percorrendo-se uma distância de 3684 unidades, de acordo com os resultados da execução do método exato para essa instância na Tabela 20.

Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
8	100,00%	3684
7	87,50%	3116
6	75,00%	2894

Tabela 20 - Soluções ótimas para a Instância 10'

Ao correr os algoritmos para a instância 10' foi obtido o valor ótimo para o número de pedidos satisfeitos, no entanto não se identificou a distância percorrida ótima. O algoritmo **H1** obteve uma distância percorrida inferior ao que se tinha verificado para a instância 10, apesar de se satisfazerem mais dois pedidos.

Instância 10'

Nº Pedidos Considerados

8

Algoritmo	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Pior caso			Melhor caso		
				Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total	Nº Pedidos Satisfeitos	% Pedidos satisfeitos	Distância total
H1	8	100,00%	7369	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_CE	8	100,00%	4145	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
H2_SE	8	100,00%	4145	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
GA1_CE	8,00	100,00%	4124	8	100,00%	4168	8	100,00%	4095
GA1_SE	8,00	100,00%	4126	8	100,00%	4145	8	100,00%	4095
GA2_CE_MP	8,00	100,00%	4133	8	100,00%	4218	8	100,00%	4095
GA2_SE_MP	8,00	100,00%	4227	8	100,00%	4891	8	100,00%	4095
GA2_CE_DM	8,00	100,00%	4318	8	100,00%	4852	8	100,00%	4095
GA2_SE_DM	8,00	100,00%	4285	8	100,00%	4824	8	100,00%	4102

Tabela 21 - Resultados obtidos para a Instância 10'

No caso dos algoritmos **H2_CE**, foi obtida uma solução melhor para a instância 10 do que para a instância 10', ainda que na segunda a informação seja disponibilizada mais cedo. Na instância 10' terá sido efetuada uma das sete primeiras inserções numa posição em que na instância 10 já não era possível inserir e que, para decisão estática associada a esse pedido, seria a melhor inserção, mas que terá impedido uma inserção posterior que na instância 10' foi possível realizar.

8. Análise de Resultados

Novamente, o critério 'Desempenho Médio' aparenta levar a distâncias percorridas superiores ao que ocorre para o critério 'Melhor Pior Caso', apesar da pior solução identificada pelos algoritmos **GA2** ter sido obtida pelo algoritmo **GA2_SE_MP**.

9. Conclusões

Nas instâncias analisadas, os algoritmos em que se recorre a heurísticas de inserção, em que se procura obter limites para decisões humanas, conduziram a resultados tendencialmente piores do que os obtidos com recurso ao Algoritmo Genético. Como seria de prever, os algoritmos **H2_CE** e **H2_SE** levaram a soluções melhores do que o algoritmo **H1**.

Relativamente aos critérios de abordagem a folgas, 'Com Espera' e 'Sem Espera, não se extraíram conclusões relevantes, não havendo, na maior parte das instâncias consideradas, diferenças significativas entre os resultados obtidos com cada um desses critérios. Apenas será de salientar que em algumas das instâncias o algoritmo **GA2_SE_DM** leva a distâncias percorridas particularmente elevadas, em comparação com o que ocorre para o algoritmo **GA2_CE_DM**.

A incorporação da componente previsionial nos Algoritmo Genéticos levou a melhores resultados em termos de número de pedidos satisfeitos em várias instâncias, mais propriamente nas instâncias 1, 5 e 6. No entanto, considera-se ter havido a tendência para que se obtivessem maiores distâncias percorridas. O método usado para prever pedidos, que consiste num processo de reamostragem aleatória a partir de um conjunto de pedidos conhecidos, não permite obter boas previsões, o que terá afetado negativamente o desempenho dos algoritmos com recurso aos cenários previsionais. Adicionalmente, considera-se que também terá tido um

impacto negativo o facto de se poderem obter conjuntos de pedidos previstos muito distintos em decisões próximas. Julga-se ser preferível que o método usado para obter previsões seja mais robusto, e que permita obter previsões com maior qualidade.

Não tendo sido tiradas conclusões relevantes sobre os critérios de abordagem a folgas, como referido acima, considera-se que será preferível não fazer essa distinção, o que permite uma redução no número de algoritmos considerados. Em alternativa, podem incluir-se dois métodos distintos para obter previsões com o objetivo de obter limites para um método "real", à semelhança do que sucede para os algoritmos **H1** e **H2**.

Ainda relativamente ao critério de abordagem a folgas, poderá ser realizada uma análise preliminar a resultados obtidos com cada um deles em instâncias de teste, de forma a optar pelo que corresponder a resultados melhores. No caso dos algoritmos em que se considera a componente previsionial, ao avaliar as várias soluções poderá ser considerada, para cada solução, uma execução 'Com Esperas' e uma execução 'Sem Espera'.

No que diz respeito aos critérios de seleção de soluções, em várias das execuções em que os algoritmos **GA2** levaram a piores resultados, o recurso ao 'Melhor Pior Caso' aparenta corresponder a um deterioramento de resultados mais moderado do que o critério 'Desempenho Médio'. Isso é verificado nas instâncias 5 a 10, em que a cenarização aparenta ter tido um impacto negativo, o que se considera ter ocorrido sobretudo devido ao número reduzido de pedidos e à respetiva proximidade ao final do horizonte temporal definido. Na análise às instâncias indicadas, constatou-se que a cenarização foi implementada de uma forma em que não é considerado o fim do horizonte temporal, ou seja, nas decisões finais podem ocorrer pedidos previstos com janelas temporais total ou parcialmente posteriores ao término do horizonte temporal fixado, e ao avaliar cada solução são também consideradas as afetações desses pedidos. Esse aspeto terá tido um impacto negativo nos resultados obtidos para os algoritmos **GA2**, especialmente nas instâncias 5 a 10 por apenas ser considerado um conjunto de pedidos colocados mais tardiamente.

Relativamente às instâncias 5 a 10, mais propriamente à forma como foram abordadas, será mais benéfico considerar um 2º período mais alargado. Também se considera que será mais vantajoso fixar um número de pedidos para o 2º período, em alternativa a definir um instante em que esse 2º período se inicia. O método usado fez com que o número de pedidos considerados fosse excessivamente baixo em algumas das instâncias, sobretudo nas instâncias 7 e 8. Mesmo em relação ao

total de pedidos para o horizonte temporal, será preferível fixar o número de pedidos, em alternativa a definir um intervalo para esse valor.

Nos resultados obtidos com os algoritmos que recorrem ao Algoritmo Genético, sem componente previsional, foi frequente verificar-se um conjunto reduzido de diferentes soluções nas 20 execuções realizadas para cada instância. Considera-se que isso estará relacionado com a forma como foi construído o Algoritmo Genético. Por um lado, poderá ser preferível que a obtenção da geração inicial possa resultar em soluções admissíveis mais variadas, em que se permita alterar a ordenação relativa de locais de visita obrigatória verificados em soluções obtidas na decisão imediatamente anterior. No entanto, julga-se que a operação cruzamento tende a preservar pouca informação dos progenitores, e que esse aspeto foi particularmente relevante para a referida baixa variabilidade de soluções.

Considera-se, portanto, que efetuar alterações ao nível das operações seria vantajoso. No entanto, um dos motivos determinantes para as opções feitas ao nível das operações foi a necessidade de reduzir tempos de execução. No sentido de permitir maior margem para se poderem considerar operações alternativas, seria relevante alterar outros aspetos do algoritmo que contribuam para que as operações possam ser realizadas de forma mais célere.

Poderá ser benéfico permitir que se obtenham indivíduos não admissíveis em relação ao cumprimento de janelas temporais, em que o respetivo incumprimento levasse a uma penalização no valor de *fitness*. Assim, promover-se-ia a realização de operações mais rápidas, permitindo-se que fossem exploradas operações alternativas com tendência para uma maior preservação de informação.

Em relação ao problema considerado, poderão ser identificadas diversos aspetos cuja introdução contribuiria para uma maior aproximação a cenários reais. Nesse sentido, será apropriado considerar como objetivo único a minimização do custo, ou maximização de lucro, em que se poderá englobar em simultâneo a distância percorrida, a duração das deslocações e da realização de cargas e descargas, e o número de pedidos satisfeitos ou carga transportada. Quanto a restrições, será particularmente relevante contemplar restrições à circulação que poderão estar associadas a determinadas regiões, ou restrições decorrentes da legislação existente sobre tempos de repouso de motoristas e limitações associadas a tempos de condução.

Bibliografia

- [1] AECOM (2014) Collection and Analysis of Data on the Structure of the Road Haulage Sector in the European Union. Disponível em: http://ec.europa.eu/transport/modes/road/studies/road_en.htm
- [2] Airbus (2013) Airbus and IBM to help aircraft operators optimize fleet management and operations. Disponível em: <http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-release-detail/detail/airbus-and-ibm-to-help-aircraft-operators-optimize-fleet-management-and-operations/>
- [3] BESTUFS (2004) Consolidated Best Practice Handbook. Disponível em: http://www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=4161
- [4] BESTUFS (2007) Guia de Boas Práticas no Transporte Urbano de Mercadorias. Disponível em: http://www.bestufs.net/gp_guide.html
- [5] Comissão Europeia (2011) Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system. Disponível em: http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white_paper_2011_ia_full_en.pdf
- [6] Comissão Europeia (2011) Roteiro do espaço único europeu dos transportes – Rumo a um sistema de transportes competitivo e económico em recursos. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144>
- [7] Dantzig, G.; Ramser, J. (1959). "The truck dispatching problem". Management Science, 6(1): 80–91.
- [8] ECR - Efficient Consumer Response (2000) The Transport Optimisation Report.. Disponível em: <https://www.gs1.ch/docs/default-source/prozesse-dokus/ecr-europe-transport-optimisation.pdf?sfvrsn=2>
- [9] EEA - European Environment Agency (2010) Towards a resource-efficient transport system. Disponível em: <http://www.eea.europa.eu/publications/towards-a-resource-efficient-transport-system>
- [10] EPA - Environment Protection Agency (1999) Getting More for Less - Improving Collection Efficiency. Disponível em: <http://www3.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/landfill/coll-eff/r99038.pdf>

- [11] Eurostat (2014) Energy, transport and environment indicators. Disponível em: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics_-_modal_split
- [12] Kumar S. N.; Panneerselvam, R. (2012). "A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants". Intelligent Information Management, 4: 66-74.
- [13] Laporte, G. (1992) "The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms", European Journal of Operational Research 59: 343-358.
- [14] Maersk Line (2014) Sustainability 2014. Disponível em: <http://www.maerskline.com/~media/maersk-line/Countries/int/Images/Sustainability/maerskline-sustainability-2014-v2.pdf>
- [15] OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento (2014) The Cost of Air Pollution: Health Impacts of Road Transport. Disponível em: <http://www.oecd.org/env/the-cost-of-air-pollution-9789264210448-en.htm>
- [16] OMS - Organização Mundial da Saúde (2013) Make Walking Safe. Disponível em: http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/make_walking_safe/en/
- [17] Pillac, V.; Gendreau, M.; Guéret, C.; Medaglia, A (2011) "A Review of Dynamic Vehicle Routing Problems". Cirrelt, 62.
- [18] Pillac, V.; Guéret, C.; Medaglia, A (2011) "Dynamic Vehicle Routing Problems: State of the art and Prospects", Technical Report 10/4/AUTO.
- [19] Psaraftis, H. (1995). "Dynamic Vehicle Routing: Status and Prospects", Annals of Operations Research 61(1): 143-164.
- [20] Psaraftis, H.N.; Wen M.; Kontovas, C.A. (2015) "Dynamic Vehicle Routing Problems: Three Decades and Counting", Networks.
- [21] Rodrigue, J-P et al. (2013) "The Geography of Transport Systems", Hofstra University, Department of Global Studies & Geography. Disponível em: <http://people.hofstra.edu/geotrans>.
- [22] The White House (2014) An Economic Analysis of Transportation Infrastructure Investment. Disponível em: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/economic_analysis_of_transportation_investments.pdf
- [23] Toth, P.; Vigo, D. (2002) "The Vehicle Routing Problem". SIAM.

[24] UPS – United Parcel Service (2014) Corporate Sustainability Report. Disponível em: <http://sustainability.ups.com/media/UPS-2014-Corporate-Sustainability-Report.pdf>

[25] U.S. Department of Transportation (2013) Transportation Statistics Annual Report. Disponível em: http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/TSAR_2013.pdf