



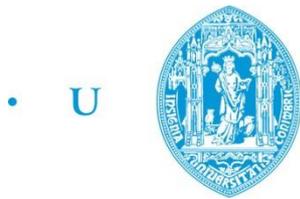
UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Guilherme Manuel Martins Baptista

**PLANEAMENTO DE ROTAS PARA A DISTRIBUIÇÃO DE
COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS MULTI-
COMPARTIMENTADOS: UMA ABORDAGEM EXATA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial
orientada pelo Professor Doutor Telmo Miguel Pires Pinto e apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra.**

julho de 2020



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Planeamento de Rotas para a Distribuição de Combustível em Veículos Multi- compartimentados: uma Abordagem Exata

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Multi-compartment Vehicle Routing Problem in Fuel Distribution: An Exact Approach

Autor

Guilherme Manuel Martins Baptista

Orientador

Telmo Miguel Pires Pinto

Júri

| | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Presidente | Professor Doutor Cristóvão Silva Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Coimbra Professor Doutor Cláudio M. Martins Alves |
| Vogais | Professor Catedrático da Universidade do Minho Professor Doutor Telmo Miguel Pires Pinto Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra |
| Orientador | Professor Doutor Telmo Miguel Pires Pinto Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra |

Coimbra, julho, 2020

“Não tenhamos pressa, mas não percam tempo.”

José Saramago

À minha família.

Agradecimentos

O desenvolvimento e elaboração de uma dissertação de Mestrado é uma longa jornada, que integra vários desafios, incertezas e alguns percalços. Apesar de ser um processo solitário engloba o contributo de diversas pessoas, as quais são merecedoras dos meus mais sinceros agradecimentos, dado que, de alguma forma, me acompanharam e auxiliaram neste momento tão importante.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Telmo Pinto, pela sua disponibilidade, apoio e estímulo ao conhecimento. Muito obrigado por ter tornado esta etapa mais acessível e por acreditar sempre no meu empenho e nas minhas capacidades.

Aos meus pais, não só por me terem dado a oportunidade de estudar na Universidade de Coimbra, sendo um sonho que bem cedo cresceu em mim, como também pelo seu apoio incondicional em todas as minhas decisões, mesmo em situações difíceis. Muito obrigado por toda a força que me deram, principalmente no início e nesta fase final.

Ao meu irmão, por ter sempre acreditado que seria capaz de terminar o curso. Muito obrigado pelas conversas e pela força partilhada para a conquista dos meus objetivos.

À Andreia, a minha namorada, que nunca me deixou desistir quer nesta reta final, quer no início do curso. Muito obrigado por estares sempre presente nos momentos importantes, por acreditares sempre nas minhas capacidades e por toda a ajuda prestada.

Aos meus grandes amigos da Residência Universitária da Alegria, eles sabem quem são, aqueles que estiveram sempre presentes tanto em momentos de festa como em momentos de estudo, na alegria e nos momentos de dificuldade. Muito obrigado por todo o vosso companheirismo, amizade e espírito de ajuda, sem vocês o menino de 17 anos não teria conseguido crescer e chegar até aqui.

À minha família, que, muito embora não esteja reunida com a frequência desejada, sempre caminhou a meu lado e me congratulou pelas minhas conquistas. Muito obrigado, em especial, ao meu Padrinho e à minha Tia que marcaram presença ativa e significativa na minha vida.

Resumo

Ao longo dos anos, o problema do planeamento de rotas tem sido alvo de estudo por diversos autores, criando várias extensões para esse problema. Um exemplo dessas extensões é o problema do planeamento de rotas em veículos multi-compartimentados. No entanto, existem poucos trabalhos na literatura com elevado reconhecimento científico acerca deste problema com janelas temporais e cuja resolução assente em abordagens exatas. Deste modo, pretende-se criar um modelo matemático para o problema do planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais. Neste caso, são distribuídos três tipos de combustíveis a um conjunto de clientes, utilizando uma frota homogénea limitada de veículos. Para isso, é necessário determinar, para cada veículo, a rota para realizar as entregas, o horário em que cada cliente é servido e a atribuição dos produtos aos compartimentos. O objetivo principal é minimizar a distância total percorrida, que corresponde à soma das distâncias percorridas por cada um dos veículos necessários à realização das entregas.

Assim, apresenta-se uma abordagem exata para o problema do planeamento de rotas em veículos multi-compartimentados com consideração explícita de janelas temporais e a inclusão do cálculo de emissões de Dióxido de Carbono (CO₂). Consideram-se ainda restrições adicionais dos contextos reais de aplicação tais como tempos de descanso para os condutores, limites de tempo para cada viagem e limites para o horário de trabalho, que não são comumente abordados na literatura. Para demonstrar a eficiência do modelo exato é realizado um conjunto de testes que permitem analisar o impacto nos diferentes KPI's (*Key Performance Indicators*), alterando os valores de algumas instâncias. Testes adicionais foram realizados em instâncias reais para avaliar o desempenho do modelo e comparar os resultados obtidos referentes ao tempo de distribuição e à distância percorrida com os resultados utilizando um algoritmo heurístico proposto na literatura.

Palavras-chave: Planeamento de rotas, Veículos multi-compartimentados, Janelas temporais, Tempo de distribuição, Distância percorrida.

Abstract

Over the years, the Vehicle Routing Problem (VRP) has been a study target for several authors, creating several extensions for this problem. An example of these extensions is the Multi-Compartment Vehicle Routing Problem (MC-VRP). However, there are few studies in the literature with high scientific recognition about this problem with time-windows and whose resolution is based on exact approaches. In this way, one intends a mathematical model creates for the Multi-compartment Vehicle Routing Problem with Time-windows (MC-VRPTW). In this case, three types of fuels are distributed to a set of clients using a limited homogeneous fleet. For that, it is necessary to determine, for each vehicle, the route to carry out the deliveries, the scheduling in each client is served, and the attribution of products to the compartments. The main objective is to minimize the total distance travelled, which corresponds to the sum of the distances travelled by each one of the necessary vehicles to the delivery's realization.

So, an exact algorithm is presented for the MC-VRP with explicit consideration of time-windows and the inclusion of the calculation of the CO₂ emissions. Additional restrictions of the actual application contexts are also considered, such as rest times for the drivers, time limits for each trip and time limits for the work's schedules, which are not commonly addressed in the literature. To demonstrate the efficiency of the exact approach there are carried out a set of tests that allow analyzing the impact in the different KPI's, changing the values of some instances. Finally, additional tests are carried out in real instances to evaluate the performance of the model and to compare the results for the distribution time and for the travelled distance with the results using a heuristics approach proposed in the literature.

Keywords Vehicle routing, Multi-compartment vehicles, Time-windows, Distribution time, Travelled Distance.

Índice

| | |
|---------------------------------------------------------------|------|
| Índice de Figuras | xi |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Siglas | xv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Enquadramento Teórico | 1 |
| 1.2. Objetivos da Dissertação | 2 |
| 1.3. Metodologia da Investigação | 3 |
| 1.4. Estrutura da Dissertação | 4 |
| 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA | 7 |
| 2.1. O Setor dos Transportes Rodoviários de Mercadorias | 7 |
| 2.2. Definição do Problema de Investigação | 8 |
| 2.3. Conclusões do Capítulo | 10 |
| 3. REVISÃO DA LITERATURA | 11 |
| 3.1. Sistemas de Distribuição de Combustível | 11 |
| 3.2. Planeamento de Rotas | 13 |
| 3.3. Transporte Sustentável | 18 |
| 3.4. Sistemas de Apoio à Decisão | 21 |
| 3.5. Análise Crítica | 22 |
| 4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO EXATO | 25 |
| 4.1. Pressupostos | 25 |
| 4.2. Definição e Formulação do Modelo | 26 |
| 4.3. Validação do Modelo | 34 |
| 4.3.1. Instâncias | 35 |
| 5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÃO | 41 |
| 5.1. Resultados para o 1º Teste | 41 |
| 5.2. Resultados para o 2º Teste | 43 |
| 5.3. Resultados para o 3º Teste | 47 |
| 6. CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO | 51 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 53 |
| ANEXO A – MATRIZ DE DISTÂNCIAS | 57 |
| ANEXO B – DADOS PARA O TEMPO DE EXECUÇÃO | 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Metodologia da Investigação. | 3 |
| Figura 2 – Distribuição das Empresas por Região de Portugal. | 8 |
| Figura 3 – Distância percorrida entre as diferentes soluções. | 16 |
| Figura 4 – Rota para o veículo 1 com o 1º Teste. | 41 |
| Figura 5 – Rota para o veículo 2 com o 1º Teste. | 41 |
| Figura 6 – Rota para o veículo 1 com o 2º Teste. | 43 |
| Figura 7 – Rota para o veículo 2 com o 2º Teste. | 44 |
| Figura 8 – Rota para o veículo 3 com o 2º Teste. | 44 |
| Figura 9 – Rota para o veículo 4 com o 2º Teste. | 44 |
| Figura 10 – Tempo de Distribuição no 1º Teste e no 2º Teste. | 45 |
| Figura 11 – Distância Percorrida no 1º Teste e no 2º Teste. | 47 |
| Figura 12 – Evolução do Tempo de Execução. | 48 |
| Figura 13 – Tempo de Distribuição nos Modelos Matemáticos para o Caso 30. | 49 |
| Figura 14 – Tempo de Distribuição nos Modelos Matemáticos para o Caso 36. | 49 |
| Figura 15 – Distância Percorrida nos Modelos Matemáticos para o Caso 30. | 50 |
| Figura 16 – Distância Percorrida nos Modelos Matemáticos para o Caso 36. | 50 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Valores obtidos no estudo elaborado por Pena et al. (2017). | 9 |
| Tabela 2 – Parâmetros definidos para o estudo de Cornillier et al. (2008b). | 15 |
| Tabela 3 – Variáveis definidas para o estudo de Cornillier et al. (2008b). | 15 |
| Tabela 4 – Abordagens utilizadas pelos diferentes autores. | 22 |
| Tabela 5 – Parâmetros do Modelo Matemático de Cornillier et al. (2009). | 28 |
| Tabela 6 – Variáveis de decisão do Modelo Matemático de Cornillier et al. (2009). | 28 |
| Tabela 7 – Parâmetros para o Desenvolvimento do Modelo Exato. | 30 |
| Tabela 8 – Variáveis de decisão para Desenvolvimento o Modelo Exato. | 32 |
| Tabela 9 – Encomendas por Cliente no 1º Teste. | 35 |
| Tabela 10 – Encomendas por Cliente no 2º Teste. | 36 |
| Tabela 11 – Janelas Temporais e Tempo de Serviço no 1º Teste e no 2º Teste. | 37 |
| Tabela 12 – Janelas Temporais e Tempo de Serviço no 3º Teste. | 38 |
| Tabela 13 – Escala horária para os veículos 1 e 2 no 1º Teste. | 42 |
| Tabela 14 – Taxa de ocupação dos veículos no 1º Teste. | 42 |
| Tabela 15 – Escala horária para todos os veículos no 2º Teste. | 44 |
| Tabela 16 – Taxa de ocupação dos veículos no 2º Teste. | 46 |

SIGLAS

CO₂ – Dióxido de Carbono

FSMPRP – *Fleet Size and Mix Pollution-Routing Problem*

GEE – Gases de Efeito de Estufa

GLRP – *Green Location-Routing Problem*

ILP – *Integer Linear Programming*

KPI – *Key Performance Indicator*

LRP – *Location-Routing Problem*

MC-VRP – *Multi-compartment Vehicle Routing Problem*

MC-VRPTW – *Multi-compartment Vehicle Routing Problem with Time-windows*

MILP – *Mixed Integer Linear Programming*

MT-VRP – *Multi-trip Vehicle Routing Problem*

PRP – *Pollution-Routing Problem*

PSRPTW – *The Petrol Station Replenishment Problem with Time-windows*

TSP – *Travelling Salesman Problem*

VBA – *Visual Basic for Applications*

VRP – *Vehicle Routing Problem*

1. INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo tem como objetivo apresentar um modelo matemático exato que permite obter um conjunto de rotas de forma a minimizar as distâncias percorridas. Deste modo, inicia-se o capítulo com o enquadramento teórico do tema referido. De seguida, são definidos os objetivos que se pretendem atingir e qual a metodologia utilizada para os alcançar. Por fim, é apresentada a estrutura da dissertação.

1.1. Enquadramento Teórico

Ao longo dos anos, a gestão da cadeia de abastecimento tem vindo a ser cada vez mais valorizada pelas organizações, uma vez que, quando gerida de forma eficiente, contribui para a sua vantagem competitiva. Esta eficiência é justificada pela evolução dos sistemas de informação, da logística, da gestão de operações, e ainda, de outras áreas (Harrison, 2005). No entanto, uma boa gestão da cadeia de abastecimento é um trabalho complexo, tendo em conta o aumento da variedade de produtos, a diminuição do ciclo de vida dos mesmos e a globalização dos negócios (Lee, 2002). De acordo com Lambert e Cooper (2000), uma boa gestão da cadeia de abastecimento requer a integração de diversas funções e entidades que permitam decidir qual a melhor forma de gerir os recursos, uma vez que as empresas passam a competir em rede.

Deste modo, é importante abordar os sistemas de distribuição presentes nas cadeias de abastecimento que permitem a interação entre as empresas. Estes sistemas têm vindo a assumir um papel cada vez mais importante, uma vez que uma boa análise e um bom planeamento permite às empresas reduzir os custos operacionais (Oliver, 2013), controlar o horário de trabalho dos distribuidores, eliminar erros humanos e utilizar meios de transporte económicos (Brown e Graves, 1981). Assim, os sistemas de distribuição, mais concretamente, o planeamento de rotas permite reduzir o número de viaturas, aumentar o transporte de mercadorias a um custo reduzido e aumentar a preocupação com a sustentabilidade (Cattaruzza et al. 2017).

O planeamento de rotas é, atualmente, abordado através da investigação operacional, que permite recorrer a ferramentas computacionais cuja modelação pode levar

ao aumento da precisão dos planeamentos a longo prazo. Adicionalmente, estas ferramentas possibilitam a simulação de diferentes cenários, permitindo às empresas optar por aquele que lhes permite obter menor distância percorrida, maior volume de encomendas entregues ou maior lucro (Oliver, 2013). Por este motivo, o Problema do Planeamento de Rotas em Veículos (VRP – *Vehicle Routing Problem*) tem sido alvo de estudo por vários autores como Toth e Vigo (2002), Avella et al. (2004), Hasle e Kloster (2007), Cornillier et al. (2008a), Ng et al. (2008), Pena et al. (2017) e Cattaruzza et al. (2017). Nos seus estudos, estes autores resolvem o problema do planeamento de rotas utilizando dois tipos de abordagens distintos: modelos exatos e algoritmos heurísticos.

Com o presente estudo pretende-se solucionar o problema do planeamento de rotas na distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais. Deste modo, opta-se por desenvolver um modelo exato, uma vez que garantem a solução ótima, como Cornillier et al. (2009) que reduziu em 24% a distância percorrida. Ao contrário dos modelos heurísticos que pretendem obter uma solução viável, como Pena et al. (2017) que reduziu apenas em 8%. Assim, verifica-se que a utilização de um modelo exato tem um impacto maior na redução da distância percorrida.

Por fim, realça-se a importância do estudo, uma vez que na literatura existem poucas referências com elevado reconhecimento científico que aborde o problema do planeamento de rotas em veículos multi-compartimentados com janelas temporais cuja resolução assente no desenvolvimento de um modelo exato para permita considerar o tempo de descanso para os condutores, o limite de horas regulares de trabalho, o limite de tempo para cada viagem e, ainda, saber qual o impacto ambiental que os veículos produzem, dada a complexidade derivada da utilização de vários veículos com compartimentos e do cumprimento das janelas temporais definidas pelos clientes.

1.2. Objetivos da Dissertação

A presente dissertação de Mestrado tem como principal objetivo desenvolver um modelo matemático exato que, com o planeamento de rotas na distribuição de combustível, permita:

- Minimizar as distâncias percorridas;
- Analisar os horários para cada veículo;

- Analisar o tempo de distribuição;
- Determinar o impacto ambiental provocado por cada veículo;
- Aumentar o nível de controlo do processo de distribuição.

1.3. Metodologia da Investigação

Este tópico tem como objetivo apresentar as diferentes etapas para a realização da presente investigação. A Figura 1 apresenta as cinco etapas fundamentais para o seu desenvolvimento.

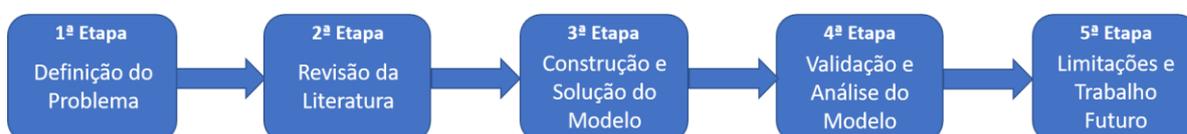


Figura 1 – Metodologia da Investigação.

1ª Etapa – Definição do Problema:

A primeira etapa metodológica consiste em identificar o problema alvo de investigação no presente estudo. Assim, define-se como problema o planeamento de rotas na distribuição de combustíveis em veículos com vários compartimentos (multi-compartimentados), tendo em consideração os horários definidos por cada cliente para a receção das encomendas (janelas temporais), uma vez que a sua resolução permite, por exemplo, reduzir os custos operacionais das empresas (Oliver, 2013) e controlar o horário de trabalho dos distribuidores (Brown e Graves, 1981).

2ª Etapa – Revisão da Literatura:

Esta etapa tem como objetivo explorar a literatura referente ao problema anteriormente identificado. Para isso, recorre-se a artigos científicos que possam justificar e fundamentar os diversos conceitos que se utilizam na presente dissertação e, ainda, à apresentação de diferentes modelos matemáticos de forma a justificar o modelo a ser

desenvolvido para o problema em estudo. Para além disso, esta etapa permite distinguir o uso de diferentes abordagens e quais os resultados obtidos utilizando cada uma delas.

3ª Etapa – Construção e Solução do Modelo:

A apresentação da segunda etapa da metodologia permite construir o modelo matemático para o planeamento de rotas, com o objetivo principal de minimizar as distâncias na distribuição de combustível. Para isso, é necessário identificar diversos parâmetros para a sua resolução, tais como a velocidade média de cada veículo, o número máximo de horas de condução permitidos por lei e o número de horas de trabalho diário de cada condutor, entre outros. Por fim, definem-se as variáveis de decisão.

4ª Etapa – Validação e Análise do Modelo:

Depois de ter uma solução possível para resolver o problema identificado, testa-se o modelo em dados relativos às encomendas diárias realizadas pelos clientes e à frota utilizada (instâncias) para verificar se é adequado ao problema em estudo. De seguida, procede-se à análise dos resultados obtidos, no entanto, caso o modelo não seja válido, é necessário repensar a terceira etapa metodológica.

5ª Etapa – Limitações e Trabalho Futuro:

Por fim, identificam-se as limitações presentes no estudo e sugerem-se algumas alterações relevantes para trabalho futuro, permitindo dar seguimento ao trabalho desenvolvido.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação de Mestrado está estruturada em seis capítulos. A sua organização é feita da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução

O capítulo inicial tem como objetivo introduzir o modelo exato que permita realizar o planeamento de rotas e, assim, minimizar as distâncias percorridas na distribuição

de combustível. Deste modo, enquadra-se o problema em estudo, definem-se os principais objetivos, apresenta-se a metodologia utilizada e estrutura-se o documento.

Capítulo 2: Descrição do Problema

No capítulo dois descreve-se o problema alvo de investigação no presente estudo. Para tal, começa-se por se efetuar uma breve análise sobre o setor dos transportes rodoviários de mercadorias que engloba as empresas de distribuição de combustível. De seguida, é apresentado o artigo de Pena et al. (2017), de forma a clarificar o problema da presente investigação. Por fim, definem-se os *Key Performance Indicators* (KPI's).

Capítulo 3: Revisão da Literatura

No terceiro capítulo são apresentados alguns modelos reconhecidos cientificamente, de modo a justificar o modelo que se pretende desenvolver. Desta forma, começa-se por avaliar os impactos que uma análise adequada e um planeamento eficaz do sistema de distribuição podem ter nas empresas e, em particular, nas empresas de combustível. De seguida, realça-se o planeamento de rotas cuja otimização tem sido alvo de estudo por parte de vários autores, uma vez que pode reduzir significativamente os custos de transporte. Para isso, pode-se recorrer a modelos exatos ou algoritmos heurísticos. Por fim, aborda-se o tema do transporte sustentável que tem vindo a ganhar cada vez mais relevância dadas as alterações climáticas e estuda-se a importância dos sistemas de apoio à decisão.

Capítulo 4: Desenvolvimento do Modelo Exato

Após ser realizada a revisão da literatura, no capítulo quatro começa-se por apresentar os pressupostos iniciais. De seguida, apresentam-se dois modelos que servem de base para desenvolver o modelo exato que permite planear as rotas, de modo a minimizar as distâncias percorridas e a analisar o tempo de distribuição. Adicionalmente, definem-se os parâmetros e as variáveis de decisão para a criação do modelo matemático. Por fim, apresentam-se o *software* utilizado e as instâncias relativas à frota utilizada, ao tipo de produto e quantidade encomendada por cada cliente e, ainda, às janelas temporais definidas pelos clientes e os tempos de serviço, que permitem realizar os testes necessários à validação e avaliação do desempenho do modelo exato desenvolvido.

Capítulo 5: Resultados Computacionais e Discussão

No capítulo cinco apresentam-se os resultados obtidos para a distância percorrida, o tempo gasto na distribuição, a taxa de ocupação de cada veículo e o tempo de execução nos 1º e 2º testes. Em cada um dos testes é ainda possível apresentar os resultados acerca do impacto ambiental dos veículos. Por fim, no 3º Teste é possível avaliar o desempenho do modelo e comparar o resultado da distância percorrida e do tempo de distribuição com os resultados utilizando uma abordagem heurística proposta na literatura.

Capítulo 6: Conclusão e Proposta de Trabalho Futuro

No último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas com a utilização do modelo exato desenvolvido em cada um dos testes. Por fim, são ainda apresentadas as limitações do presente estudo e propõem-se algumas variações no modelo exato que podem levar à resolução dessas mesmas limitações.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O segundo capítulo é iniciado com a apresentação do setor dos transportes rodoviários de mercadorias que transporta toda a tipologia de produtos, nomeadamente combustíveis. De seguida, apresenta-se o problema de investigação que consiste no desenvolvimento de um modelo exato para o planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais. Por fim, retiram-se conclusões relativas ao problema em estudo.

2.1. O Setor dos Transportes Rodoviários de Mercadorias

Nos últimos anos, o setor dos transportes rodoviários de mercadorias tem vindo a estabilizar o seu crescimento na Europa, uma vez que se verificou um aumento de apenas 1,3% em 2018 face ao ano anterior. No entanto, este crescimento permitiu atingir o valor mais elevado desde 2014, chegando a 14,8 milhões de toneladas de mercadorias transportadas (Comissão Europeia 2019).

De acordo com a Comissão Europeia (2019), a Alemanha é o país que transporta mais mercadorias, atingindo em 2018 mais de 3 milhões de toneladas transportadas em território nacional e mais de 122 mil toneladas em território internacional, situação à qual não será alheia o facto de se tratar da primeira economia europeia. Em Portugal, no mesmo ano transportaram-se cerca de 156 mil toneladas de mercadorias, ocupando o vigésimo lugar quando comparado com os 28 países pertencentes, à data, à União Europeia.

O setor do transporte rodoviário de mercadorias em Portugal, é constituído por 8237 empresas, incluindo as empresas de distribuição de combustível, de acordo com o Banco de Portugal (2019). Na Figura 2 apresenta-se a distribuição das empresas do setor de transporte de mercadorias pelas diferentes regiões de Portugal.



Figura 2 – Distribuição das Empresas por Região de Portugal.

A Figura 2 permite verificar que é nas regiões de Lisboa e Vale do Tejo e do Norte que se concentram a maioria das empresas de transporte de mercadorias, representando mais de 65% a nível nacional embora não dê informação sobre a sua dimensão. Para além disso, destaca-se ainda o número elevado de empresas na região do Centro de Portugal, que representa 24% a nível nacional. Esta distribuição geográfica está associada à importância que o setor industrial tem nestas três regiões e consequentemente à necessidade do transporte dos produtos aí produzidos.

As principais empresas nacionais do setor, considerando o volume de negócios, são a TJA, a Luís Simões, a DocTrans, entre outras (“Transportes Rodoviários de Mercadorias e Atividades de Mudanças” 2019). Em Portugal, as principais empresas de transporte de combustível, considerando o volume de negócios são a TfreitasEnergias, a Rodo Cargo, a Ambigroup Demolições, entre outras (“Transporte de Combustíveis” 2019).

2.2. Definição do Problema de Investigação

O problema de investigação objeto da presente dissertação de Mestrado surge do estudo elaborado por diversos autores acerca do Problema do Planeamento de Rotas em Veículos Multi-compartmentados (MC-VRP – *Multi-compartment Vehicle Routing Problem*), sendo também abordado por Pena et al. (2017). Para o desenvolvimento do seu estudo os autores utilizaram o software *Visual Basic for Applications* (VBA). O seu problema baseava-se na criação de um sistema de apoio à decisão que executasse o planeamento de rotas automaticamente para uma empresa de distribuição retalhista de combustível com vista a minimizar a distância total percorrida, a diminuir o tempo de

distribuição e a aumentar a taxa de ocupação dos veículos, uma vez que tinham valores insatisfatórios para a empresa no cenário inicial do estudo. Para isso, desenvolveram uma abordagem heurística utilizando duas versões diferentes. Na primeira versão a sua abordagem assentava numa heurística construtiva para o VRP e a segunda versão consistia num Problema de Planeamento de Rotas de Várias Viagens (MT-VRP – *Multi-trip Vehicle Routing Problem*).

Na Tabela 1 apresentam-se os dados dos três parâmetros, nas três situações descritas: Cenário real inicial, Versão 1 e Versão 2.

Tabela 1 – Valores obtidos no estudo elaborado por Pena et al. (2017).

| Parâmetro | Cenário real inicial | Versão 1 | Versão 2 |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Distância Percorrida [km] | 2886,5 | 2911,8 | 2655,5 |
| Ocupação dos Veículos [%] | 57 | 65 | 57 |
| Tempo de Distribuição [h] | 133,7 | 119,8 | 108,6 |

Por observação da Tabela 1 supra, verifica-se, nas duas versões, uma diminuição do tempo de distribuição face ao Cenário real inicial, mas que se traduz no aumento da taxa de ocupação dos veículos e da distância percorrida na Versão 1. Deste modo, para se atingir o objetivo pretendido, utilizou-se a Versão 2. Esta versão permitiu reduzir em 231 km a distância percorrida e em 25,1 h, mantendo a mesma taxa de ocupação dos veículos.

Neste artigo, o desenvolvimento de uma abordagem heurística permitiu aos autores reduzir em 8% as distâncias percorridas pelos veículos. A presente investigação, surge então da oportunidade de construir um modelo exato que permita diminuir a distância percorrida em comparação com a presente abordagem heurística, verificar o impacto da introdução de vários parâmetros no tempo de distribuição e, ainda, determinar o impacto ambiental de cada veículo. Deste modo, considera-se fulcral ter em conta os parâmetros referentes ao tempo de descanso para os condutores, ao limite de horas para cada viagem, ao limite de horas regulares de trabalho diário e ao cálculo das emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) de cada veículo. Assim, destaca-se a importância do presente estudo, uma vez que na literatura não é comum a existência de artigos que desenvolvam um modelo exato para o planeamento de rotas em veículos multi-compartimentados com janelas temporais, tendo em conta estes parâmetros.

Para poder analisar os resultados do presente modelo, definiram-se quatro KPI's, sendo eles, a distância percorrida, o tempo gasto na distribuição, a taxa de ocupação dos veículos e o tempo de execução, que é um indicador de programação matemática correspondente ao tempo que o *software* demora a obter resultados. A definição destes KPI's prende-se com o objetivo de comparar os resultados obtidos com o modelo exato desenvolvido com os resultados utilizando a abordagem heurística elaborada por Pena et al., (2017), utilizando instâncias iguais referentes ao número de encomendas por cliente, à quantidade encomendada por cada cliente, à frota utilizada, às janelas temporais definidas pelos clientes e aos tempos de serviço. A definição do tempo de execução permite ainda ter conhecimento sobre até quantos clientes o modelo obtém resultados rapidamente, sem existir a necessidade de recorrer a uma abordagem heurística, uma vez que em contexto industrial é necessário obter resultados em tempo real.

2.3. Conclusões do Capítulo

O presente capítulo iniciou-se com uma breve apresentação do setor dos transportes rodoviários de mercadorias. Isto permite concluir que no ano de 2018 existiu um aumento de 1,3% das mercadorias transportadas face ao ano anterior. Adicionalmente, conclui-se que a Alemanha é o país que transporta mais mercadorias de entre os 28 países da União Europeia e que Portugal ocupa o vigésimo lugar. Para além disso, verificou-se que em Portugal as regiões de Lisboa e Vale do Tejo e do Norte possuem mais de 65% das 8237 empresas deste setor.

De seguida, apresentou-se o trabalho elaborado por Pena et al. (2017) e introduziu-se o problema alvo de investigação que consiste no planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados respeitando janelas temporais. Neste sentido, pretende-se melhorar o planeamento de rotas, minimizando a distância percorrida e, para isso, opta-se por contruir um modelo matemático exato. Por fim, definiram-se quatro KPI's: a distância percorrida, o tempo de distribuição, a taxa de ocupação dos veículos e o tempo de execução.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A realização do presente capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos teóricos acerca do problema de investigação, que consiste no planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais.

Deste modo, inicia-se este capítulo com o estudo dos sistemas de distribuição de combustível e, de seguida, aborda-se o tema do planeamento de rotas. Neste tópico, são distinguidas duas metodologias para planear as rotas dos veículos: abordagem heurística e abordagem exata. Num terceiro tópico, aborda-se o tema do transporte sustentável, tendo em conta a crescente preocupação, por parte das empresas, com os problemas ambientais. Por fim, apresentam-se sistemas de apoio à decisão onde se expõem diferentes *softwares* e linguagens de programação.

Os conceitos teóricos foram obtidos através de uma pesquisa online de artigos científicos através de vários websites como o *ScienceDirect* e o *Google Scholar* onde se selecionaram palavras-chave como Planeamento de Rotas, Veículos Multi-compartimentados e Sistemas de Distribuição.

3.1. Sistemas de Distribuição de Combustível

Os sistemas de distribuição têm vindo a assumir um papel cada vez mais importante nas mais diversas empresas, uma vez que uma análise adequada e um planeamento eficaz permite-lhes reduzir os custos operacionais (Oliver, 2013). Um planeamento eficaz destes sistemas requer o controlo preciso do horário de trabalho dos condutores que efetuam a distribuição do combustível (distribuidores), a eliminação de determinados erros humanos e, ainda, a utilização de meios de transporte económicos (Brown e Graves, 1981).

A análise dos sistemas de distribuição é elaborada, atualmente, com recurso a ferramentas computacionais cuja modelação pode levar ao aumento da precisão dos planeamentos a longo prazo. Estas ferramentas simulam diferentes cenários de distribuição, permitindo assim às empresas optar por aquele que melhor as beneficie, ou seja, por aquele que lhes permita obter maior redução dos custos (Oliver, 2013).

No caso específico das empresas de combustível, autores de todo o mundo dedicaram-se ao estudo dos sistemas de distribuição deste produto, utilizando diversas abordagens e técnicas de planeamento que permitiram obter diferentes cenários.

Em 2004, Avella et al. (2004) realizaram a sua pesquisa numa empresa italiana de transportes rodoviários de combustível, em que cada um dos veículos possuía uma capacidade distinta dos demais. O objetivo principal do estudo consistia em desenvolver um modelo matemático de forma a minimizar os custos totais de distribuição, utilizando os recursos disponíveis e satisfazendo os pedidos dos clientes. No entanto, esta empresa apresentava uma condicionante, pois o combustível de cada compartimento só podia ser entregue numa única estação, uma vez que cada tanque só circulava cheio ou vazio. Os autores conseguiram reduzir entre 5% e 25% nos respetivos custos e evidenciaram o elevado impacto que estas economias apresentaram nos custos totais da empresa, uma vez que o transporte associado à distribuição representa cerca de 10% a 25% dos custos totais.

Mais tarde, em 2008, Cornillier et al. (2008b) abordaram o mesmo tema utilizando, no entanto, uma frota heterogénea ilimitada de veículos compartimentados para distribuírem produtos petrolíferos a postos de gasolina. Deste modo, pretendia-se determinar a quantidade de combustível necessária a transportar em cada veículo para que quando se abastecessem os postos de gasolina fosse possível satisfazer a procura dos clientes de cada um dos postos. Neste caso, os autores estavam ainda limitados a colocar apenas um único produto por compartimento, isto é, por exemplo, apenas gasóleo ou gasolina, e o seu conteúdo não podia ser dividido entre estações.

Adicionalmente, no mesmo ano, os mesmos autores publicaram outro artigo relativo ao tema dos sistemas de distribuição de combustível, agora com um conjunto de veículos que possuíam um trator e um ou dois reboques com quatro a seis compartimentos que poderiam transportar entre 6000 a 17000 litros de combustível (Cornillier et al. 2008a). Para que houvesse estabilidade na condução dos veículos, os autores definiram que a parte frontal dos reboques deveria ser esvaziada no final.

Em Hong Kong, ainda em 2008, Ng et al. (2008) utilizaram uma frota heterogénea de oito navios que podiam conter três tipos de combustíveis: gasolina sem chumbo, gasolina sem chumbo *premium* e diesel. Esta empresa tinha a seu cargo 48 estações com capacidades distintas e estava encarregue do controlo de stock e do reabastecimento de cada uma delas.

No ano seguinte, Cornillier et al. (2009) abordaram novamente o tema dos sistemas de distribuição, aplicando o seu estudo a uma empresa sediada no Québec, Canadá cuja entrega dos produtos petrolíferos foi realizada por um número limitado de veículos heterogêneos. Para o seu estudo recorreram a instâncias referentes a um dia de trabalho e assumiram que cada veículo podia fazer várias viagens apesar de cada estação só poder ser reabastecida uma vez. O objetivo principal do seu estudo consistia em maximizar o lucro, retirando da receita de vendas os custos das rotas e das horas extraordinárias dos distribuidores.

A análise de cinco casos de estudo distintos permite verificar que existem diversos sistemas de distribuição, cada um adaptado a situações distintas e com diferentes condicionantes. No entanto, todos têm como objetivo principal a satisfação da procura e a minimização dos custos totais. Deste modo, para a escolha do sistema deve-se ter em conta não só a procura dos clientes e o tipo de frota utilizada, como também, o planeamento de rotas na distribuição de combustível desde a estação inicial até cada um dos seus clientes.

3.2. Planeamento de Rotas

Atualmente, o planeamento de rotas e a sua otimização são alvo de estudo por vários autores como, por exemplo, Toth e Vigo (2002), Hasle e Kloster (2007) e Cattaruzza et al. (2017). Estes autores, nas suas pesquisas verificaram que a otimização das rotas dos veículos numa empresa pode levar a que estas economizem entre 5% a 30% nos custos de transporte. Deste modo, o planeamento de rotas de veículos tem como principal objetivo obter um custo de transporte total mínimo. Para isso é necessário ter em consideração a localização da empresa que presta o serviço de transporte de combustível, ou seja, o local de onde partem os seus veículos com combustível, a localização de todos os postos de combustível a serem abastecidos, e ainda, as distâncias entre a empresa e cada um dos postos e as distâncias entre cada um dos postos a serem fornecidos (Laporte, 1987). Esta abordagem consiste em determinar m rotas de veículos, cada uma a começar e a acabar no mesmo local, de forma a que cada posto seja visitado apenas uma vez e assim minimizar os custos. O valor de m , em alguns casos é determinado logo no início, no entanto, noutros é considerada uma variável de decisão (Laporte et al. 2000). Para tomarem essa decisão, os autores têm em

conta que a procura numa rota não pode exceder a capacidade total do veículo e que a duração da rota não pode ultrapassar o tempo inicialmente estabelecido.

A importância do planeamento de rotas prende-se não só com a redução do número de viaturas a circular e com a redução do custo de transporte de mercadorias, mas também, com a preocupação com a sustentabilidade, uma vez que ao reduzir-se o número de viaturas, reduzem-se as emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE), a poluição e o ruído (Cattaruzza et al., 2017). Para satisfazer a procura, o objetivo do planeamento de rotas, de acordo com Cattaruzza et al. (2017), é diferente para empresas privadas e para empresas públicas. As empresas privadas têm em conta apenas o menor custo e as empresas públicas realizam simulações de tráfego para analisar as diferentes possibilidades das rotas, utilizando diferentes fatores, como por exemplo evitar congestionamentos.

A otimização do planeamento de rotas é cada vez mais utilizada e as rotas podem ser definidas de acordo com dois tipos de abordagens: exata e heurística (Drexl, 2012).

Em primeiro lugar, a abordagem exata é baseada em algoritmos de programação matemática que garantem uma solução ótima. No entanto, esta requer muito tempo e memória interna do computador, principalmente quando se trata de problemas com inúmeras variáveis. Nesta abordagem, os algoritmos mais conhecidos são os métodos de ramificação, de corte e de preço (Pena et al., 2017) que consistem na otimização matemática para a resolução de problemas de Programação Linear Inteira (ILP – *Integer Linear Programming*) e de problemas de Programação Linear Inteira Mista (MILP – *Mixed Integer Linear Programming*).

Um exemplo de uma abordagem exata é o caso de estudo realizado por Cornillier et al. (2008b). Estes autores começaram por definir um conjunto de estações, $V = \{1, \dots, n\}$, um subconjunto de estações, $S \subseteq V$, e a frota que estaria apta à satisfação da procura mínima nessas estações, $K(S)$. Adicionalmente, definiram que o custo, $d_{S,k}$, derivado da utilização de um veículo $k \in K(S)$ para corresponder a toda a procura do subconjunto $S \subseteq V$ pode ser aproximado a um Problema de Vendedor Ambulante (TSP – *Travelling Salesman Problem*), tendo em conta as precedências necessárias. De seguida, assumiram que $|S| \leq 2$, que existia um veículo com o menor custo, $k^* \in K(S)$, e que se um veículo for a todas as estações $S \subseteq V$ é necessário uma variável binária, $x_S = 1$. Deste modo, o problema pode ser definido da seguinte forma:

$$\text{Minimizar: } \sum_{S \subseteq V, S \neq \emptyset} d_{S,k^*} * x_S \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{S: i \in S} x_S = 1 \quad i \in V \quad (2)$$

$$x_S = 0 \text{ ou } 1 \quad S \subseteq V, S \neq \emptyset \quad (3)$$

No entanto, ao aplicar esta abordagem, os autores verificaram que não era possível encontrar uma solução ótima, tendo em conta o número de subconjuntos $S \subseteq V$ e a dificuldade em determinar, não só, o custo associado à utilização de um veículo, $d_{S,k}$, como também, o veículo com o menor custo, $k^* \in K(S)$. Deste modo, optaram por desenvolver outra metodologia para o planeamento de rotas, considerando agora o problema das cargas nos camiões, ou seja, a forma como é distribuído o combustível pelos veículos, e ainda, a condição $|S| \leq 2$. Para isso, definiram um conjunto de parâmetros e variáveis apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3, respetivamente.

Tabela 2 – Parâmetros definidos para o estudo de Cornillier et al. (2008b).

| Constantes | Definição |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a_t | Capacidade mínima do tanque $t \in T$: $a_t = \text{Max}\{0, m_t - s_t\}$ |
| b_t | Capacidade máxima do tanque $t \in T$: $b_t = P_t - s_t$ |
| m_t | Nível mínimo de stock no tanque $t \in T$ para satisfazer a procura no horizonte temporal planeado |
| P_t | Capacidade utilizável do tanque $t \in T$ |
| Q_c | Capacidade do compartimento $c \in C$ |
| s_t | Nível inicial de stock no tanque $t \in T$ |

Tabela 3 – Variáveis definidas para o estudo de Cornillier et al. (2008b).

| Variáveis | Definição |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| x_t | Quantidade no tanque $t \in T$ |
| y_{tc} | Variável binária igual a 1 se o compartimento $c \in C$ é ocupado para responder à procura no tanque $t \in T$ e 0, caso contrário |

Assim, tendo em conta os parâmetros apresentados na Tabela 2 e as variáveis apresentadas na Tabela 3, o modelo foi reformulado e é dado por:

$$\text{Maximizar: } \sum_{t=1}^T x_t \quad (4)$$

$$\text{Sujeito a: } a_t \leq x_t \leq b_t \quad t \in \{1, \dots, T\} \quad (5)$$

$$x_t \leq \sum_{c=1}^C Q_c * y_{tc} \quad t \in \{1, \dots, T\} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{tc} \leq 1 \quad c \in \{1, \dots, C\} \quad (7)$$

$$y_{tc} = 0 \text{ ou } 1 \quad t \in \{1, \dots, T\}; c \in \{1, \dots, C\} \quad (8)$$

Contrariamente à função (1), a função (4) tem como principal objetivo maximizar a quantidade de combustível em cada tanque que deve ser entregue nas estações. Neste sentido, começaram por estabelecer limites para a quantidade de combustível no tanque $t \in T$ através da equação (5). De seguida, definiram que essa mesma quantidade não pode exceder a capacidade do compartimento $c \in C$ através da equação (6) e, por fim, que a procura no tanque $t \in T$ pode ser atribuída a qualquer compartimento $c \in C$ através da equação (7).

Cornillier et al. (2008b) compararam a sua solução atual com quatro cenários diferentes nos quais apenas a procura de combustível mínima e máxima varia. Cada um destes cenários foi distinguido por uma letra A, B, C e D, o que permitiu comparar as distâncias percorridas pelos veículos em cada um dos quatro cenários (Figura 3).

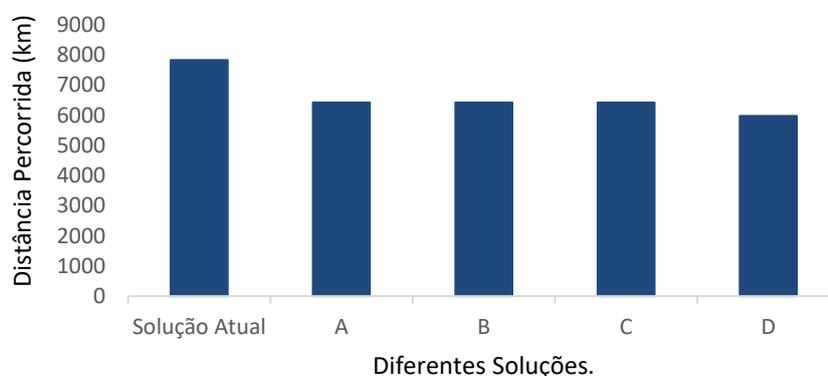


Figura 3 – Distância percorrida entre as diferentes soluções.

A partir da Figura 3 verifica-se que a solução atual é aquela que apresenta uma distância percorrida maior com um total de 7827,5 km. Nos cenários A, B e C foi percorrida uma distância de 6481,9 km e no cenário D 5972,3 km. Isto significa que, os investigadores ao aplicarem um algoritmo exato, reduziram as distâncias percorridas, conseguindo nos cenários A, B e C percorrer menos 1346 km e no cenário D menos 1855 km.

Em segundo lugar, a abordagem utilizando heurísticas pode ser construtiva ou de melhoria. Os métodos construtivos são utilizados quando se pretende calcular uma solução inicial viável e os métodos de melhoria permitem melhorar de forma iterativa uma solução já encontrada.

Os métodos heurísticos construtivos mais usados são o algoritmo de pesquisa de vizinhança mais próxima e o algoritmo de economia Clarke e Wright que possui, inclusive, um modelo paralelo e um modelo sequencial (Pena et al., 2017). De acordo com Laporte et al. (2000) e Drexl (2012) os métodos heurísticos não garantem a solução ótima, mas permitem que se encontre uma solução de boa qualidade, mesmo para problemas de elevada complexidade.

Um exemplo da aplicação deste tipo de abordagem é o caso de estudo de Pena et al. (2017). No seu estudo, para determinar as rotas, utilizaram o modelo paralelo do algoritmo de Clarke e Wright de modo a calcular a poupança que se tem nas distâncias com o planeamento de rotas. Desta forma, consideraram o custo de cada viagem, $C_{ij} (i, j) \in N$, em que N representa o conjunto de rotas, e definiram a seguinte equação:

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij} \quad (i, j = 1, \dots, n; i < j) \quad (9)$$

De seguida, por cada $S_{ij} (i, j) \in N$, ou seja, por cada poupança, verificaram se existiam duas rotas distintas, que começassem no mesmo depósito inicial e terminassem no mesmo local e, desta forma, pudessem ser facilmente reunidas. Sempre que isto se verificou foi possível incluir o arco $(i, j) \in N$ a uma rota.

Em conclusão, comparando a abordagem exata efetuada por Cornillier et al. (2008b) com a abordagem heurística elaborada por Pena et al. (2017) no que diz respeito à distância percorrida a primeira abordagem obteve uma redução de 24% enquanto que a segunda abordagem apenas reduziu 8%. Desta forma, pode-se afirmar que um modelo exato permite obter uma solução melhor, uma vez que diminui mais a distância percorrida.

3.3. Transporte Sustentável

O desenvolvimento sustentável define-se como a satisfação das necessidades das gerações do presente, sem colocar em risco as necessidades das gerações futuras (Brian R. Keeble, 1988). No que diz respeito à mobilidade sustentável, devem ser implementadas duas medidas que consistem na diminuição dos trajetos em cada rota e na utilização de veículos movidos a eletricidade ou outras fontes de energia renováveis.

Em 2011, foi realizado um estudo por Bektaş e Laporte (2011) no qual indicaram os diversos impactos ambientais causados pelo transporte de mercadorias. Esses impactos são a acidificação das águas, os efeitos tóxicos nos ecossistemas e nos humanos, o ruído e o efeito causado pelas emissões de GEE. Para além disso, os autores verificaram que as emissões de GEE causadas pelo setor dos transportes, desde 1990 até 2005, aumentaram de 24,9% para 27,3%. De acordo com os autores, a quantidade de gases poluentes emitida por um veículo depende da carga transportada e da velocidade. Na tentativa de avaliar as emissões de GEE os autores criaram uma extensão do VRP, o Problema de Planeamento de Rotas-Poluição (PRP – *Pollution-Routing Problem*).

Com o objetivo de minimizar os custos das emissões de gases com a utilização dos veículos e dos funcionários associados à distribuição, os autores começaram por definir um grafo $G = (N, A)$, no qual $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ representa o conjunto de nós e A representa o conjunto de arcos definidos entre cada par de nós. A frota utilizada no seu estudo representa-se por $K = \{1, 2, \dots, m\}$ e cada veículo tem uma capacidade, Q . Adicionalmente, o conjunto de clientes é dado por $N_0 = N \setminus \{0\}$ e cada cliente $i \in N_0$ exige uma quantidade q_i que deve ser satisfeita no intervalo de tempo $[a_i, b_i]$. O tempo que cada veículo demora para satisfazer a procura do cliente $i \in N_0$ é dado por t_i e a distância entre $i \in N_0$ e $j \in N_0$ é representada por d_{ij} . Deste modo, Bektaş e Laporte (2011) criaram um modelo exato no qual utilizaram uma variável binária x_{ij} que é igual a 1 se um veículo viajar no arco $(i, j) \in A$ e 0, caso contrário. Para além disso, em cada arco utilizaram duas variáveis f_{ij} $(i, j) \in A$ e v_{ij} $(i, j) \in A$ que representam, respetivamente, a quantidade de mercadoria e a velocidade de cada veículo no arco. Para representar o tempo de serviço no nó $j \in N_0$ utilizaram a variável y_j . Deste modo, o modelo desenvolvido pelos autores é representado por:

$$\text{Minimizar: } \sum_{(i,j) \in A} (c_f + e) \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} (c_f + e) \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} (c_f + e) d_{ij} \beta (\sum_{r \in R} (v^r)^2 z_{ij}^r) + \sum_{j \in N_0} p s_j \quad (10)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j \in N} x_{0j} = m \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_0 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N_0 \quad (13)$$

$$\sum_{j \in N} f_{ji} - \sum_{j \in N} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in N_0 \quad (14)$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (15)$$

$$y_i - y_j + t_i + (\sum_{r \in R} \left(\frac{d_{ij}}{v^r}\right)^2 z_{ij}^r) \leq M_{ij}(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N, j \in N_0, i \neq j \quad (16)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in N_0 \quad (17)$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{r \in R} \left(\frac{d_{j0}}{v^r}\right)^2 z_{j0}^r \leq L(1 - x_{j0}) \quad \forall j \in N_0 \quad (18)$$

$$\sum_{r \in R} z_{ij}^r \leq x_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (20)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (21)$$

$$z_{ij}^r \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A, r \in R \quad (22)$$

A função objetivo é constituída por quatro parcelas. A primeira parcela, é referente ao custo que a empresa tem, tendo em conta a distância que cada veículo percorre; a segunda, é referente ao custo da carga transportada por cada veículo; a terceira, deve-se ao custo associado às variações de velocidade e, por último, a quarta, representa o custo relacionado com os motoristas.

No que diz respeito às restrições, a (11) indica que existem $m \in K$ viaturas a partir do depósito e as (12) e (13) permitem a garantia de que cada cliente é visitado uma só vez. A equação (14) permite modelar o fluxo transportado tendo em conta a quantidade que cada cliente quer e a equação (15) é utilizada para que a carga total que um veículo transporta seja inferior ou, no máximo, igual à sua capacidade. Adicionalmente, as restrições (16) e (17) impõem que as janelas temporais sejam cumpridas e, por fim, a restrição (18) é utilizada para calcular o tempo de condução de cada viatura. Deste modo, os autores verificaram que a minimização das emissões de GEE não representam todos os custos e que é necessário ter também em conta outros fatores, tais como os custos da mão-de-obra ou os custos com os

combustíveis e que, de facto, o seu modelo é uma ferramenta útil para avaliar o impacto da redução energética e das taxas carbónicas.

Em 2012, Dekker et al. (2012) realizaram um estudo que lhes permitiu concluir que a sociedade atual, para além do objetivo em obter lucro, preocupa-se com os impactos ambientais causados pelas pessoas, empresas e governos. Segundo os autores, deve ser realizada uma pesquisa de operações que permita a utilização eficiente dos recursos e a correta identificação entre os aspetos ambientais e os custos associados com as emissões de GEE, diminuindo-os não só no transporte, como também no armazenamento e no consumo de produtos.

No ano de 2014, Koç et al. (2014) realizaram uma extensão do PRP, em que utilizaram uma frota heterogénea, designada por Combinação do Problema de Planeamento de Rotas-Poluição e Tamanho de Frota (FSMPRP – *Fleet Size and Mix Pollution-Routing Problem*). O objetivo dos autores seria minimizar os custos da frota e das rotas. Os autores referem-se aos custos das rotas como sendo o custo do combustível, das emissões de CO₂ e dos motoristas. Com a realização do seu estudo, os autores conseguiram medir os *trade-offs* entre os diferentes indicadores de custos, tais como os custos dos veículos, a distância percorrida, o combustível e as emissões de gases, custos com os condutores e, conseqüentemente, os custos totais associados ao transporte.

Mais tarde, em 2019, os autores Dukkanci et al. (2019) realizaram uma combinação entre o Problema de Planeamento da Localização de Rotas (LRP – *Location-Routing Problem*), e o PRP. Esta combinação permitiu aos autores atingirem o Problema de Planeamento da Localização Verde de Rotas, (GLRP – *Green Location-Routing Problem*). O GLRP consiste em três fatores distintos:

1. Localizar depósitos num conjunto de pontos, dos quais os veículos serão enviados para chegar aos clientes;
2. Direcionar os veículos planeando a ordem pela qual os clientes vão ser servidos;
3. Determinar a velocidade em cada parte do trajeto, por forma a que os clientes sejam atendidos tendo em conta as janelas temporais.

O seu objetivo principal foi minimizar uma única função de custo que englobasse não só os custos fixos operacionais de cada depósito, como também os custos associados às emissões de combustível e de CO₂. De acordo com os autores, outra aplicação do GLRP tem surgido

do crescente desenvolvimento tecnológico nos veículos, como exemplo existe o surgimento de veículos, normalmente caminhões, que são seguidos por veículos semiautónomos com a mesma velocidade. Deste modo, ao realizar-se o transporte a velocidade constante existe uma diminuição no consumo de combustível, nos congestionamentos e no número de acidentes.

3.4. Sistemas de Apoio à Decisão

Os sistemas de apoio à tomada de decisão apresentam uma enorme relevância no transporte de combustíveis, uma vez que permitem fazer a atribuição dos veículos desde o depósito inicial até aos clientes e o horário das entregas de modo sistemático e com elevada eficiência (Ng et al., 2008). Estes sistemas dependem em grande escala dos *softwares* implementados pelas próprias empresas.

De acordo com Pena et al. (2017) foi possível desenvolver no seu estudo um sistema de apoio à decisão, utilizando o VBA. Assim, como entradas utilizaram instâncias reais, como a quantidade encomendada de cada produto por cliente, a janela temporal de cada cliente, o tempo necessário para descarregar a encomenda, o consumo de cada veículo, a quantidade de compartimentos que cada veículo possui e a capacidade de cada um dos compartimentos. Deste modo, tendo em conta as entradas introduzidas, obtiveram-se os dados referentes às rotas de cada viatura, o tempo de espera de cada viatura em cada cliente, a quantidade de combustível consumida, o tempo da rota e qual o combustível atribuído aos diferentes compartimentos de cada uma das viaturas. De acordo com os autores, este sistema de apoio à decisão não apresentou qualquer custo financeiro e permitiu automatizar o processo de planeamento de rotas da empresa.

Para além do *software* anteriormente abordado, é possível codificar os algoritmos em linguagem *Objective-C* (Cornillier et al., 2008b) ou em *C++* (Cornillier et al., 2012). No caso de estudo realizado por Cornillier et al. (2008b), a utilização da linguagem *Objective-C* permitiu realizar diferentes testes. No primeiro teste, os autores avaliaram o desempenho do algoritmo no problema das cargas dos caminhões, ou seja, na atribuição do combustível aos veículos; no segundo teste, verificaram o algoritmo todo para o problema do reabastecimento das estações de combustível e, por fim, no terceiro teste, solucionaram um caso de um distribuidor local. Esta abordagem exata permitiu concluir que

a sua solução tem um bom desempenho, no entanto, pode ter que ser ajustada devido a condições de tráfego ou a flutuações na procura. Adicionalmente, esta análise contribuiu de forma positiva para a empresa em estudo, uma vez que ficou mais consciente dos impactos benéficos da otimização do seu problema.

3.5. Análise Crítica

No presente capítulo apresentou-se a revisão da literatura dos conceitos teóricos abordados no presente estudo que consiste num modelo matemático que permita planear rotas, com o objetivo de minimizar as distâncias percorridas na distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados. Assim, começou-se por estudar os diferentes sistemas de distribuição de combustível abordados por diversos autores que se dedicam a esta área. Isto permitiu verificar que um planeamento eficiente dos sistemas de distribuição permite que as empresas reduzam os respetivos custos totais entre 5% a 25% (Avella et al., 2004). Deste modo e tendo em conta a complexidade do problema, no modelo matemático desenvolvido o sistema para a distribuição do combustível é composto por uma frota homogénea limitada e cada veículo possui compartimentos com capacidades iguais.

Na sequência deste tópico, introduziu-se o planeamento de rotas cuja sua otimização pode levar a que uma empresa economize entre 5% a 30% nos custos de transporte (Cattaruzza et al., 2017). Esta otimização é possível ser realizada através de dois tipos de abordagens: exatas e heurísticas. A Tabela 4 apresenta o tipo de abordagem utilizada nos estudos elaborados por diversos autores que se dedicaram a esta área.

Tabela 4 – Abordagens utilizadas pelos diferentes autores.

| Autores | Abordagem exata | Abordagem heurística |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Avella et al. (2004) | X | X |
| Cornillier et al. (2008a) | | X |
| Cornillier et al. (2008b) | X | |
| Cornillier et al. (2009) | X | X |
| Ng et al. (2008) | | X |
| Pena et al. (2017) | | X |

| Autores | Abordagem exata | Abordagem heurística |
|----------------|------------------------|-----------------------------|
| Total | 3 | 5 |

Por observação da Tabela 4, é possível afirmar que o tipo de abordagem mais utilizada é a heurística. Nestes artigos, os autores utilizam maioritariamente a abordagem heurística construtiva, uma vez que esta permite obter uma solução inicial viável. A utilização de abordagens exatas, apesar de permitir encontrar uma solução ótima, requer muito tempo para a obtenção de resultados, o que justifica o facto de os investigadores as utilizarem em menor escala. Da exposição de dois casos de estudo foi possível concluir que a utilização de um modelo exato reduziu em 24% a distância percorrida enquanto que um algoritmo heurístico reduziu apenas em 8%, o que permite concluir que no presente estudo o foco para a resolução do presente problema de planeamento de rotas é a abordagem exata.

De seguida, abordou-se o tema do transporte sustentável, valorizando o facto de as empresas estarem cada vez mais preocupadas com o ambiente e com as emissões de GEE. É de realçar o esforço das empresas para a transparência sustentável, uma vez que a sociedade tem vindo a desenvolver a sua preocupação para com o ambiente e para com as alterações climáticas. Esta transparência pode ter impacto na rede de clientes destas mesmas empresas, devido ao facto de lhes proporcionar vantagem competitiva tendo em conta que os responsáveis devem optar por uma empresa mais sustentável. Assim, para referenciar o transporte sustentável no modelo desenvolvido apenas se consideram as emissões de CO₂ a partir do combustível consumido, em função da distância percorrida por cada veículo.

Por último, abordaram-se os sistemas de apoio à decisão, pois permitem verificar o desempenho das metodologias elaboradas pelos diferentes investigadores, isto é, permitem certificar que se atingiram os objetivos inicialmente estabelecidos e quantificar a redução em termos de distâncias, custos ou tempo. A análise destes sistemas permitiu verificar que a utilização de algoritmos exatos, apesar de requerer maior capacidade de memória interna do computador, apresenta um desempenho melhor, ou seja, que se atingem melhores percentagens de otimização, o que leva a concluir que apesar do esforço e do tempo necessários para a obtenção de resultados esta abordagem é a mais adequada para os problemas referentes aos sistemas de apoio à decisão no processo de distribuição de combustível.

Concluindo, na presente dissertação será realizada uma abordagem exata para o planeamento de rotas na distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais, com o objetivo de minimizar a distância percorrida.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO EXATO

No quarto capítulo é apresentado o modelo exato desenvolvido para o planeamento de rotas na distribuição de combustível, com o objetivo de minimizar a distância percorrida desde o depósito inicial até aos clientes e entre clientes. Para tal, começam-se por definir os pressupostos iniciais para clarificar algumas ideias não explícitas.

De seguida, apresentam-se dois modelos matemáticos que servem de base para o desenvolvimento do presente modelo exato, permitindo assim definir os parâmetros e as variáveis de decisão. Por fim, apresentam-se as instâncias utilizadas para o processo de validação e para a avaliação do desempenho do modelo desenvolvido.

4.1. Pressupostos

Tendo em consideração o principal objetivo da presente dissertação, para o desenvolvimento do modelo matemático é necessário assumir determinados pressupostos, tais como:

- Apenas é considerado o período normal de trabalho;
- A quantidade encomendada por cliente não pode exceder a capacidade do compartimento;
- A frota é homogénea e limitada;
- Cada cliente deve ser visitado apenas uma vez;
- Vários clientes podem ser visitados pelo mesmo veículo;
- Cada cliente define a sua janela temporal;
- Os tempos de serviço são conhecidos;
- Cada condutor deverá fazer uma paragem para descanso em cada viagem;
- Todos os veículos circulam à mesma velocidade média.

Os nove pressupostos apresentados permitem assim definir e formular o modelo exato para o problema do planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais.

4.2. Definição e Formulação do Modelo

Para a definição e formulação do modelo exato para o planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados são tidos em conta os modelos desenvolvidos por El Fallahi et al. (2008) e Cornillier et al. (2009). A análise detalhada dos artigos desenvolvidos por estes autores permite identificar as semelhanças existentes com o presente estudo e, assim, utilizar algumas restrições no modelo a desenvolver.

Em primeiro lugar, de acordo com El Fallahi et al. (2008) o Problema do Planeamento de Rotas em Veículos Multi-compartimentados (MC-VRP) define-se numa rede não direcionada completa com um conjunto de nós $N = \{0, 1, \dots, n\}$, que inclui o depósito inicial (nó 0) e um conjunto de n clientes. Cada arco (i, j) tem um custo $c_{ij} = c_{ji}$ e a desigualdade do triângulo é satisfeita pelo conjunto de custos. Os depósitos armazenam o conjunto de produtos, $P = \{1, 2, \dots, p\}$ que deve ser fornecido por um conjunto de veículos homogéneos, $V = \{1, 2, \dots, v\}$ com p compartimentos. Assim, o produto $p \in P$ é alocado ao compartimento p de cada veículo, que possui uma capacidade conhecida Q_p . A quantidade pedida por cada cliente $i \in N$, q_{ip} , deve ser inferior ou igual a Q_p . Por fim, os autores definem um comprimento máximo para cada rota, L , e apresentam o seu modelo da seguinte forma:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in V} c_{ij} x_{ijk} \quad (23)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i \in N} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in N', \forall k \in V \quad (24)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = \sum_{i \in N} x_{jik} \quad \forall j \in N', \forall k \in V \quad (25)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall k \in V, \forall S \subseteq N', |S| \geq 2 \quad (26)$$

$$y_{jkp} \leq \sum_{i \in N} x_{ijk} \quad \forall j \in N', \forall k \in V, \forall p \in P \quad (27)$$

$$\sum_{k \in V} y_{jkp} = 1 \quad \forall j \in N', \forall p \in P \quad (28)$$

$$\sum_{j \in N'} y_{jkp} q_{jp} \leq Q_p \quad \forall k \in V, \forall p \in P \quad (29)$$

$$\sum_{i,j \in N} c_{ij} x_{ijk} \leq L \quad \forall k \in V \quad (30)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j, \forall k \in V \quad (31)$$

$$y_{jkp} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N', \forall k \in V, \forall p \in P, q_{jp} \neq 0 \quad (32)$$

Neste caso, a função objetivo (23) minimiza os custos totais de todos os itens. A restrição (24) indica que cada cliente apenas pode ser visitado por cada rota, no máximo, uma vez. A restrição (25) garante a continuidade da rota, isto é, um veículo ao entrar no nó $j \in N'$ deverá deixá-lo. Para eliminar sub-rotas utiliza-se a restrição (26). Com a restrição (27) determina-se y_{jkp} como 0 para cada produto $p \in P$, caso o cliente $j \in N'$ não seja visitado pelo veículo $k \in V$ e 1, caso contrário e com a restrição (28) garante-se que cada produto encomendado por um cliente é trazido por um único veículo. No que diz respeito à exigência, não só, da capacidade de cada compartimento, como também, do comprimento da rota utilizam-se as restrições (29) e (30). Por fim, a variável binária x_{ijk} (31) é igual a 1 se o arco (i, j) for percorrido pelo veículo $k \in V$ e 0, caso contrário e a variável binária y_{jkp} (32) toma o valor 1 se ao cliente $j \in N'$ for entregue o produto $p \in P$ pelo veículo $k \in V$ e 0, caso contrário. Assim, o estudo do modelo desenvolvido por El Fallahi et al. (2008) permite verificar que o principal objetivo dos autores é minimizar o custo e não, como na presente abordagem exata, a distância percorrida.

Em segundo lugar, de acordo com Cornillier et al. (2009) o Problema do Reabastecimento de Estações de Combustível considerando Janelas Temporais (PSRPTW – *The Petrol Station Replenishment Problem with Time-windows*) define-se como um grafo direcionado $G = (V^*, A) = (V \cup \{0\}, A)$, no qual o conjunto de estações (nós) é dado por $V = \{1, \dots, n\}$, o vértice 0 é o depósito inicial e o conjunto de arcos é dado por $A = \{(i, j) : i, j \in V^*, i \neq j\}$. O custo e o tempo de cada viagem associado ao arco $(i, j) \in A$ são dados por c_{ij} e t_{ij} , respetivamente, e o tempo de serviço em cada estação $i \in V^*$ é dado por s_i . O problema consiste na maximização do lucro, efetuando rotas de entrega para reabastecer estações com uma frota heterogénea de K veículos com início no depósito. O veículo deve respeitar a janela temporal $[\alpha_i, \beta_i]$ de cada estação $i \in V$. Neste caso, o dia útil contém H horas de trabalho regulares, podendo ser prolongadas a H' horas extraordinárias e o custo variável total é dado pela soma dos salários regulares e das horas extraordinárias. Parte-se do pressuposto que todos os veículos viajam à mesma velocidade e que cada um seja subdividido em diferentes compartimentos. Cada um destes compartimentos está associado a um tipo de produto. O modelo gera todas as rotas viáveis que os veículos possam fazer, respeitando as janelas temporais e as quantidades a serem entregues. Para cada rota r , podem-se saber os primeiros e os últimos horários de partida, α_r e β_r respetivamente, permitindo assim minimizar o tempo total de espera. Assim, para este modelo, os autores definiram sete

parâmetros apresentados na Tabela 5 e quatro variáveis de decisão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 – Parâmetros do Modelo Matemático de Cornillier et al. (2009).

| Parâmetro | Definição |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a_{sr} | Parâmetro binário igual a 1 se a estação $s \in V$ é satisfeita pela rota r e 0, caso contrário |
| α_r | Horário de partida mais cedo para a rota r |
| β_r | Horário de partida mais tarde para a rota r |
| λ_r | Duração mínima da rota r |
| ρ_{rk} | Lucro da rota r se realizada pelo veículo $k \in K$. Este parâmetro é igual a $-\infty$ se o veículo $k \in K$ não executar a rota r |
| ϕ | Salário regular por hora |
| ϕ' | Salário de horas extras por hora |

Tabela 6 – Variáveis de decisão do Modelo Matemático de Cornillier et al. (2009).

| Variável | Definição |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| d_{kv} | Tempo de partida do veículo $k \in K$ para a viagem v |
| h_k | Número de horas regulares de trabalho do veículo $k \in K$ |
| h'_k | Número de horas extraordinárias de trabalho do veículo $k \in K$ |
| x_{rkv} | Variável binária que toma o valor 1 se a rota r corresponde à viagem v do veículo $k \in K$ e o valor 0, caso contrário |

De acordo com os parâmetros e as variáveis de decisão apresentados nas Tabelas 7 e 8, Cornillier et al. (2009) definiram o seu modelo da seguinte forma:

$$\text{Maximizar: } \sum_{(r,k,v)} \rho_{rk} x_{rkv} - \phi \sum_k h_k - \phi' \sum_k h'_k \quad (33)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{(r,k,v)} a_{sr} x_{rkv} = 1 \quad \forall s \quad (34)$$

$$\sum_r x_{rkv} \leq 1 \quad \forall (k, v) \quad (35)$$

$$\sum_r x_{rk,v+1} \leq \sum_r x_{rkv} \quad \forall (k, v) \quad (36)$$

$$\sum_r \alpha_r x_{rkv} \leq d_{kv} \leq \sum_r \beta_r x_{rkv} + M(1 - \sum_r x_{rkv}) \quad \forall (k, v) \quad (37)$$

$$d_{k,v+1} \geq d_{kv} + \sum_r \lambda_r x_{rkv} \quad \forall (k, v) \quad (38)$$

$$d_{kv} - d_{k,1} + \sum_r \lambda_r x_{rkv} \leq h_k + h'_k \quad (39)$$

$$h_k \leq H \quad \forall k \quad (40)$$

$$h'_k \leq H' \quad \forall k \quad (41)$$

$$d_{kv} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall (k, v) \quad (42)$$

$$h_k \in \mathbb{R}^+, h'_k \in \mathbb{R}^+ \quad \forall k \quad (43)$$

$$x_{rkv} \in \{0, 1\} \quad \forall (r, k, v) \quad (44)$$

A função objetivo (33) permite maximizar o lucro total. Com a restrição (34) certifica-se que cada uma das estações é visitada uma única vez. A restrição (35) garante que no máximo uma rota é atribuída à viagem v feita pelo veículo $k \in K$. Através da restrição (36), assegura-se que a viagem $v + 1$ feita pelo veículo $k \in K$ só existe se a viagem v existir. Na restrição (37), M é um número positivo e assegura-se que os horários de partida para as rotas estejam de acordo com as janelas temporais. Para indicar que a viagem $v + 1$ ocorra após a viagem v utiliza-se a restrição (38). Uma vez que não se sabe o número de viagens realizadas pelo veículo $k \in K$, a restrição (39) permite garantir que o número de horas de trabalho, isto é, horas regulares e horas extraordinárias, seja menor ou igual que a diferença entre o último tempo de retorno da viagem e o primeiro tempo de partida. As restrições (40) e (41) satisfazem os limites permitidos para as horas regulares e extraordinárias. Deste modo, o estudo do modelo exato desenvolvido por Cornillier et al. (2009) permite verificar que o principal objetivo dos autores é maximizar o lucro e, para isso, têm em conta o número de horas regulares e extraordinárias que os trabalhadores fazem diariamente.

Assim, o modelo exato desenvolvido para o planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados que respeitem janelas temporais pode ser definido como um grafo direcionado $G = (L, C) = (L' \cup \{0\}, C)$, em que o conjunto de locais a serem fornecidos (nós) é dado por $L' = \{1, \dots, n\}$, 0 representa o depósito inicial, e o conjunto de caminhos (arcos) é dado por $C = \{(i, j): i, j \in L', i \neq j\}$. O custo de cada viagem associado ao arco $(i, j) \in C$, que neste caso corresponde à distância percorrida nesse mesmo arco, é representado por d_{ij} e o tempo de serviço em cada estação $i \in L'$ é dado por s_i . O problema consiste na minimização de distâncias que permitam obter rotas com início e fim no depósito para entrega dos produtos, $P = \{1, \dots, p\}$, aos clientes com uma frota homogénea de veículos, $V = \{1, \dots, v\}$, cada um com p compartimentos. O veículo deve respeitar a janela temporal $[\alpha_i, \beta_i]$ de cada cliente e o compartimento p de cada veículo possui uma capacidade conhecida Q_p , sendo alocado a um tipo de produto p . A quantidade pedida por cada cliente $i \in L'$, q_{ip} , deve ser inferior ou igual a Q_p .

Desta forma, em primeiro lugar, definem-se os parâmetros necessários para o modelo exato, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros para o Desenvolvimento do Modelo Exato.

| Parâmetro | Definição |
|------------|----------------------------------------------------------------|
| a_k | Velocidade média do veículo $k \in V$ |
| d | Tempo para descanso em cada viagem |
| FE | Fator de Emissão de CO ₂ |
| h | Número de horas de trabalho do condutor |
| S_i | Tempo de serviço no cliente $i \in L$ |
| t | Número máximo de horas que um condutor pode conduzir sem parar |
| α_i | Tempo inicial da janela temporal no cliente $i \in L$ |
| β_i | Tempo final da janela temporal no cliente $i \in L$ |

A Tabela 7 apresentada introduz os parâmetros essenciais para a formulação e desenvolvimento do modelo exato e as suas definições.

Em primeiro lugar, os parâmetros $[\alpha_i, \beta_i]$ representam, respetivamente, o início e o fim das janelas temporais estipuladas por cada cliente. O valor de S_i determina o tempo de serviço necessário para efetuar a entrega em cada cliente.

Em segundo lugar, o parâmetro α_k indica a velocidade média à qual os veículos se deslocam. De acordo com o Decreto-lei n.º44/2005 de 23 de fevereiro do Ministério da Administração Interna (2005), Artigo 27.º, as velocidades máximas permitidas para os veículos pesados de mercadorias sem reboque são 50 km/h dentro das localidades e 90 km/h nas autoestradas. Tendo em consideração que os veículos se deslocam, principalmente, nestes locais permite chegar a uma velocidade média de 70 km/h. Para além disso, existe ainda a necessidade de ter em conta o facto de os veículos transportarem mercadoria perigosa e em grandes quantidades, pelo que se utiliza uma velocidade média de 55 km/h (Pena et al. 2017).

Em terceiro lugar, o parâmetro d é utilizado para a existência de um descanso para os condutores. A sua utilização deve-se ao que está estipulado pela Lei n.º72/2013 de 3 de setembro de 2013 da Assembleia da República (2013), Artigo 83.º em Anexo, que permite, por questões de segurança, definir tempos de descanso para os condutores profissionais de veículos de transporte e possuir um segundo condutor habilitado para a condução do mesmo veículo, caso exista essa necessidade. Neste caso, como as viagens não são muito longas utiliza-se apenas um condutor por cada veículo e assume-se um tempo de descanso de 15 minutos em cada viagem, ou seja, 0.25 horas.

Em quarto lugar, o parâmetro t permite definir o tempo máximo que um condutor pode conduzir sem descanso. Para se poder quantificar esse tempo é tido em conta o Decreto-Lei n.º117/2012 de 5 de junho do Ministério da Economia e do Emprego (2012), Artigo 5.º que indica que deve existir um intervalo de descanso de 30 minutos, se a viagem tiver duração entre seis a nove horas, e, caso exceda as nove horas, de 45 minutos. Para além disso, de acordo com o mesmo Decreto Lei é permitida a divisão do tempo de descanso por períodos mínimos de 15 minutos. Tendo em conta estes valores e uma vez que se utiliza o parâmetro d , o tempo máximo que um condutor pode conduzir sem descanso é de duas horas.

Em quinto lugar, a definição do parâmetro h_k é justificada pela Lei N.º 7/2009, de 12 fevereiro da Assembleia da República (2009), Artigo 203.º que está presente no

Código do Trabalho. Esta Lei determina que o período normal de trabalho não pode ultrapassar as oito horas diárias. Deste modo, utiliza-se o período normal de trabalho para todos os condutores, permitindo assim elaborar o planeamento das rotas que permita distribuir os combustíveis a todos os clientes.

Por último, em sexto lugar, o parâmetro FE permite obter o fator de emissão de CO_2 . O seu valor foi determinado com base no trabalho elaborado por Carvalho (2014). De acordo com o autor, para se determinar o impacto ambiental de cada veículo utiliza-se o seguinte fator de conversão: $2,70 \text{ kgCO}_2/l_{\text{diesel}}$.

Após a justificação dos valores utilizados para cada um dos parâmetros, a Tabela 8 apresenta as variáveis de decisão do modelo exato.

Tabela 8 – Variáveis de decisão para Desenvolvimento o Modelo Exato.

| Variável | Definição |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| e_k | Variável que indica a emissividade de cada veículo $k \in V$ |
| w_{ik} | Variável temporal que representa o início do serviço no cliente $i \in L$ quando servido pelo veículo $k \in V$ |
| x_{ijk} | Variável binária que toma valor 1 se o arco $(i, j) \in C$ for percorrido pelo veículo $k \in V$, tomando valor 0 caso contrário |
| y_{jkp} | Variável binária que toma o valor 1 se o produto $p \in P$ for entregue ao cliente $j \in N'$ pelo veículo $k \in V$, tomando valor 0 caso contrário |
| z_{jk} | Variável binária que toma o valor 1 se o veículo $k \in V$ visita o cliente $j \in L'$, tomando valor 0 caso contrário |

Assim, tendo em conta os parâmetros, apresentados na Tabela 7, e as variáveis de decisão, definidas na Tabela 8, formula-se o problema da seguinte forma:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i,j \in L} \sum_{k \in V} d_{ij} x_{ijk} \quad (45)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i \in L} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in L', \forall k \in V \quad (46)$$

$$\sum_{i \in L} x_{ijk} = \sum_{i \in L} x_{jik} \quad \forall j \in L', \forall k \in V \quad (47)$$

$$y_{jkp} \leq \sum_{i \in L} x_{ijk} \quad \forall j \in L', \forall k \in V, \forall p \in P \quad (48)$$

$$\sum_{k \in V} y_{jkp} = 1 \quad \forall j \in L', \forall p \in P \quad (49)$$

$$\sum_{j \in L'} y_{jkp} q_{jp} \leq Q_p \quad \forall k \in V, \forall p \in P \quad (50)$$

$$w_{ik} \geq \sum_{j \in L'} \alpha_i x_{ijk} \quad \forall i \in L, \forall k \in V \quad (51)$$

$$w_{ik} \leq \sum_{j \in L'} \beta_i x_{ijk} + M * (1 - \sum_{j \in L'} x_{ijk}) \quad \forall i \in L, \forall k \in V \quad (52)$$

$$\left(\frac{d_{ij} x_{ijk}}{a_k} \right) \leq tz_{jk} \quad \forall i \in L, \forall j \in L', j \neq i, \forall k \in V \quad (53)$$

$$w_{ik} + s_i x_{ijk} + \left(\frac{d_{ij} x_{ijk}}{a_k} \right) + dz_{jk} - w_{jk} \leq M(1 - x_{ijk}) \quad \forall i \in L, \forall j \in L', \forall k \in V \quad (54)$$

$L', \forall k \in V$

$$\frac{\sum_{i,j \in L} d_{ij} x_{ijk}}{a_k} \leq h_k \quad \forall k \in V \quad (55)$$

$$e_k = \sum_{i,j \in L} d_{ij} x_{ijk} * \left(\frac{c_k}{100} \right) * FE \quad \forall k \in V \quad (56)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j, \forall k \in V \quad (57)$$

$$y_{jkp} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N', \forall k \in V, \forall p \in P, q_{jp} \neq 0 \quad (58)$$

$$z_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in L', \forall k \in V \quad (59)$$

$$c_k \in \mathbb{R}^+ \quad \forall k \in V \quad (60)$$

$$w_{ik} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in L, \forall k \in V \quad (61)$$

Neste caso, a função objetivo (45) minimiza as distâncias efetuadas pelos veículos. A restrição (46) indica que cada cliente apenas pode ser visitado no máximo uma vez por cada rota. A restrição (47) garante a continuidade da rota, isto é, um veículo ao entrar no nó $j \in L'$ deverá deixá-lo. Com a restrição (48) determina-se y_{jkp} como 0 para cada produto $p \in P$ no caso do cliente $j \in L'$ não ser visitado pelo veículo $k \in V$ e como 1, caso contrário. Com a restrição (49) garante-se que cada produto que um cliente encomenda é trazido por um único veículo. No que diz respeito à exigência, não só, da capacidade de cada compartimento, como também, das janelas temporais utilizam-se as restrições (50), (51) e (52), ou seja, com estas restrições garante-se que as capacidades dos compartimentos não são excedidas e que as entregas são realizadas dentro das janelas temporais definidas pelos clientes. Adicionalmente, a restrição (53) assegura que o tempo que o veículo $k \in V$ demora a percorrer desde o nó $i \in L$ para o cliente $j \in L'$ não exceda t horas uma vez que a variável binária z_{jk} toma valor 1 quando o cliente $j \in L'$ é visitado pelo veículo $k \in V$ e 0 quando isso não acontece e a restrição (54) garante que o início do serviço no cliente $j \in L'$ só

acontece após a paragem para descanso, d , a realização do serviço no cliente $i \in L$ e a respetiva viagem no arco $(i, j) \in C$. Para garantir que se trabalha um número fixo de horas utiliza-se a restrição (55). A restrição (56) é utilizada para verificar as emissões de CO₂ obtidas a partir do consumo de combustível de cada veículo nas entregas. Por fim, a variável binária x_{ijk} (57) é igual a 1 se o arco $(i, j) \in C$ for percorrido pelo veículo $k \in V$ e a 0, caso contrário, a variável binária y_{jkp} (58) toma o valor 1 se o produto $p \in P$ for entregue ao cliente $j \in N'$ pelo veículo $k \in V$ e 0, caso contrário, e, por fim, a variável binária z_{jk} (59) toma o valor 1 se a encomenda do cliente $j \in L'$ for entregue pelo veículo $k \in V$ e 0, caso contrário.

Depois de se definir e apresentar o modelo exato, este é validado com recurso a instâncias reais. Para tal, procede-se à execução de um conjunto de testes.

4.3. Validação do Modelo

Para a validação do modelo desenvolvido são usadas instâncias reais e utiliza-se o programa *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, versão 12.10. A sua escolha recai sobre o facto de o *software* de otimização ser um dos que possui uma boa performance e possuir uma versão gratuita disponível para a comunidade académica. Nos testes computacionais realizados é utilizado um processador Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz, 2712 Mhz, com 8 GB de memória RAM.

Deste modo, para validar o modelo recorre-se a três testes distintos baseados em diferentes instâncias. Com o 1º Teste analisam-se os valores dos KPI's definidos. Com o 2º Teste verifica-se qual o impacto nos KPI's ao alterar os valores das quantidades encomendadas e ao aumentar de 7 para 14 o número de encomendas. Por fim, com o 3º Teste avalia-se o tempo de execução de 36 casos distintos. Estes casos diferem entre si no número de clientes podendo ser 5, 10, 15 ou 20, no número de encomendas por cada cliente, que pode ser 1, 2 ou 3 e no número de veículos utilizados que vão desde 1 até 4. Para além disso, recorrendo a instâncias reais alteradas por questões de confidencialidade, compara-se o tempo de distribuição e a distância percorrida, entre o modelo exato desenvolvido e a abordagem heurística elaborada por Pena et al. (2017).

4.3.1. Instâncias

4.3.1.1. Frota

Para a distribuição dos produtos aos clientes, estão disponíveis quatro veículos pesados de mercadorias sem reboque. Cada um dos veículos possui três compartimentos, uma vez que se distribuem três produtos diferentes que não podem ser misturados. Todos os veículos são movidos a diesel e têm um consumo médio de 30 l/100 km.

Os compartimentos de cada veículo possuem uma capacidade de 5000 litros e a cada compartimento é alocado apenas um tipo de produto. O compartimento 1 transporta apenas gásóleo agrícola, o compartimento 2 transporta gásóleo rodoviário e, por último, o compartimento 3 transporta gásóleo de aquecimento. No 1º Teste apenas dois veículos são utilizados, no 2º Teste são utilizados quatro veículos e, por fim, no 3º Teste são analisados diferentes casos com variações no número de veículos utilizados.

4.3.1.2. Tipos de Produtos e Quantidades Encomendadas

Assume-se que os clientes podem encomendar três tipos de produtos diferentes: Gásóleo Agrícola, Gásóleo Rodoviário e Gásóleo de Aquecimento.

No 1º Teste as encomendas, em litros, para cada um dos produtos, referentes a um dia de trabalho são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Encomendas por Cliente no 1º Teste.

| Cliente | Gasóleo agrícola [l] | Gasóleo rodoviário [l] | Gasóleo de aquecimento [l] | Total [l] |
|------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|-----------|
| 1 | 500 | – | – | 500 |
| 2 | – | 5000 | – | 5000 |
| 3 | – | 1000 | – | 1000 |
| 4 | – | – | 800 | 800 |
| 5 | 500 | – | – | 500 |
| 6 | 800 | – | – | 800 |
| 7 | – | – | 800 | 800 |
| Total [l] | 1800 | 6000 | 1600 | 9400 |

Por observação da Tabela 9 é possível verificar que o Cliente 2 e o Cliente 3 encomendam maior quantidade, ambos de gasóleo rodoviário. Estas encomendas atingem os 6000 l, excedendo a capacidade do compartimento (5000 l). Adicionalmente, verifica-se que o gasóleo de aquecimento é o produto menos encomendado. Assim, em sete encomendas, e com um total de 9400 l encomendados, a quantidade de gasóleo rodoviário representa cerca de 64% das encomendas, a quantidade de gasóleo agrícola representa cerca de 19% e a quantidade de gasóleo de aquecimento representa cerca de 17%.

Com o 2º Teste verifica-se qual o impacto nos KPI's ao alterar os valores das quantidades encomendadas e ao aumentar de 7 para 14 o número de encomendas. A Tabela 10 apresenta os dados referentes às alterações efetuadas.

Tabela 10 – Encomendas por Cliente no 2º Teste.

| Cliente | Gasóleo agrícola [l] | Gasóleo rodoviário [l] | Gasóleo de aquecimento [l] | Total [l] |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1 | 5000 | 1500 | – | 6500 |
| 2 | – | 5000 | 4200 | 9200 |
| 3 | – | 1000 | 4200 | 5200 |
| 4 | 1850 | – | 800 | 2650 |
| 5 | 500 | 1250 | – | 1750 |
| 6 | 800 | 1250 | – | 2050 |
| 7 | 1850 | – | 800 | 2650 |
| Total [l] | 10000 | 10000 | 10000 | 30000 |

Através da Tabela 10, verifica-se que o Cliente 2 é aquele que apresenta uma maior encomenda com um total de 9200 l e que o Cliente 5 é o que apresenta uma menor encomenda, com apenas 1750 l. Para além disso, verifica-se também que todos os produtos são encomendados em igual quantidade.

No 3º Teste, a quantidade diária de cada encomenda é sempre igual a 1000 l.

4.3.1.3. Janelas Temporais e Tempo de Serviço

A entrega do combustível é realizada de acordo com a disponibilidade de cada cliente. Deste modo, cada um apresenta a sua janela temporal e define-se o tempo de serviço. Estes fatores têm um papel muito importante no planeamento das rotas.

Na Tabela 11 apresentam-se as janelas temporais e o tempo de serviço em cada um dos clientes no 1º Teste.

Tabela 11 – Janelas Temporais e Tempo de Serviço no 1º Teste e no 2º Teste.

| Cliente | Início da janela temporal [h] | Fim da janela temporal [h] | Tempo de serviço [h] |
|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 7 | 18 | 0,25 |
| 2 | 7 | 18 | 0,33 |
| 3 | 7 | 18 | 0,33 |
| 4 | 7 | 18 | 0,25 |
| 5 | 8 | 13 | 0,25 |
| 6 | 7 | 18 | 0,25 |
| 7 | 7 | 11 | 0,25 |

Através da Tabela 11 é possível verificar que a maioria dos clientes pode receber as encomendas a partir das 7h, exceto o Cliente 5, que apenas pode receber a partir das 8h. Para além disso, os clientes podem receber as encomendas no máximo até às 18h, com exceção do Cliente 5 e do Cliente 7 que apenas podem receber até às 13h e às 11h, respetivamente. É possível verificar ainda que no Cliente 2 e no Cliente 3 são necessárias cerca de 0,33 h (aproximadamente 20 minutos) para se efetuar a entrega do combustível e nos restantes clientes cerca de 0,25 h (15 minutos).

As janelas temporais e o tempo de serviço em cada um dos clientes no 3º Teste são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Janelas Temporais e Tempo de Serviço no 3º Teste.

| Cliente | Início da janela temporal [h] | Fim da janela temporal [h] | Tempo de serviço [h] |
|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 7 | 18 | 0,25 |
| 2 | 7 | 18 | 0,33 |
| 3 | 7 | 18 | 0,33 |
| 4 | 7 | 18 | 0,25 |
| 5 | 8 | 13 | 0,25 |
| 6 | 7 | 18 | 0,25 |
| 7 | 7 | 11 | 0,25 |
| 8 | 7 | 18 | 0,25 |
| 9 | 7 | 18 | 0,25 |
| 10 | 7 | 18 | 0,33 |
| 11 | 7 | 18 | 0,25 |
| 12 | 8 | 13 | 0,33 |
| 13 | 7 | 18 | 0,33 |
| 14 | 7 | 18 | 0,25 |
| 15 | 8 | 13 | 0,25 |
| 16 | 7 | 18 | 0,25 |
| 17 | 7 | 11 | 0,25 |
| 18 | 7 | 18 | 0,25 |
| 19 | 7 | 18 | 0,25 |
| 20 | 7 | 18 | 0,33 |

Através da Tabela 12 é possível verificar que a maioria dos clientes pode receber as encomendas a partir das 7h, exceto o Cliente 5, o Cliente 12 e o Cliente 15, que apenas podem receber a partir das 8h. Para além disso, os clientes podem receber as encomendas no máximo até às 18h, com exceção do Cliente 5, do Cliente 7, do Cliente 12, do Cliente 15 e do Cliente 17 que apenas podem receber até às 13h, às 11h, às 13h, às 13h e às 11h, respetivamente.

4.3.1.4. Distância

A matriz de distâncias que permite saber o número de quilómetros percorridos quer no 1º Teste, quer no 2º Teste é apresentada em Anexo A. Para além disso, é apresentada no mesmo Anexo uma outra matriz que permite saber as distâncias utilizadas no 3º Teste.

5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÃO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados computacionais obtidos com o modelo desenvolvido, tendo em conta o conjunto de testes apresentado no capítulo anterior.

5.1. Resultados para o 1º Teste

O 1º Teste tem como objetivo analisar os valores dos KPI's obtidos no modelo exato, sendo eles a distância percorrida, o tempo de distribuição, a taxa de ocupação dos veículos e o tempo de execução. Para se obterem os resultados do 1º Teste, recorrendo ao *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, o tempo de execução é de cerca de cinco segundos. As Figuras 4 e 5 apresentam as rotas para o 1º Teste.

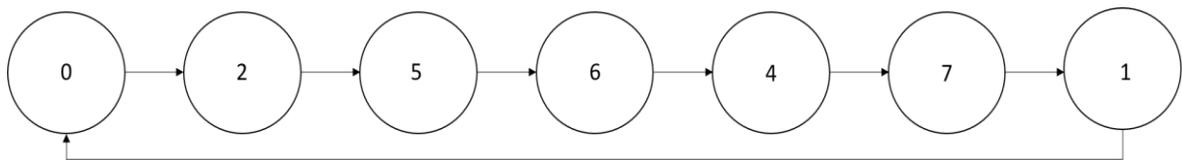


Figura 4 – Rota para o veículo 1 com o 1º Teste.



Figura 5 – Rota para o veículo 2 com o 1º Teste.

Por observação das Figuras 4 e 5, verifica-se que o veículo 1 entrega as encomendas de seis clientes. Tendo em conta a Tabela 9, apresentada no Capítulo 4, verifica-se que um dos compartimentos atinge a capacidade máxima disponível. Uma vez que o Cliente 3 encomenda o mesmo tipo de produto, torna-se necessário recorrer ao veículo 2. Este veículo entrega apenas a encomenda de um cliente, saindo do depósito inicial até ao Cliente 3 e, no final, regressa. Deste modo, garante-se que as capacidades dos compartimentos não são excedidas pelas quantidades encomendadas.

De seguida, apresentam-se o horário de partida no depósito inicial e as horas em que cada veículo deve efetuar a entrega em cada cliente, respeitando as janelas temporais definidas no Capítulo 4. A Tabela 13 apresenta os horários dos dois veículos para os sete clientes.

Tabela 13 – Escala horária para os veículos 1 e 2 no 1º Teste.

| Nó | Horário do veículo 1 [h] | Horário do veículo 2 [h] |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 07:15 | 07:15 |
| 1 | 11:24 | – |
| 2 | 07:22 | – |
| 3 | – | 07:20 |
| 4 | 09:39 | – |
| 5 | 08:01 | – |
| 6 | 08:44 | – |
| 7 | 10:33 | – |

Através da Tabela 13 verifica-se que ambos os veículos saem do depósito inicial às 7:15 h. O veículo 1 que entrega seis encomendas demora cerca de 4,147 h e o veículo 2 demora apenas cerca de 0,083 h (5 minutos), uma vez que entrega apenas uma encomenda. Assim, o tempo de distribuição é de 4,23 h.

De seguida, para analisar a taxa de ocupação de cada veículo é apresentada a Tabela 14 que indica a taxa de ocupação de cada compartimento dos veículos 1 e 2.

Tabela 14 – Taxa de ocupação dos veículos no 1º Teste.

| Veículo | Compartimento | Capacidade ocupada [l] | Capacidade máxima [l] | Taxa de ocupação [%] |
|----------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1 | 1800 | 5000 | 36 |
| | 2 | 5000 | 5000 | 100 |
| | 3 | 1600 | 5000 | 32 |
| 2 | 1 | – | 5000 | 0 |
| | 2 | 1000 | 5000 | 20 |

| Veículo | Compartimento | Capacidade ocupada [l] | Capacidade máxima [l] | Taxa de ocupação [%] |
|---------|---------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| | 3 | – | 5000 | 0 |

A partir da Tabela 14 verifica-se que no Veículo 1, o Compartimento 1 tem uma taxa de ocupação de 36%, o Compartimento 2 de 100% e o Compartimento 3 de 32%, apresentando uma taxa de ocupação média de cerca de 56%. Adicionalmente, verifica-se que no Veículo 2 apenas o Compartimento 2 é ocupado com uma taxa de 20%, possuindo uma taxa de ocupação média de cerca de 7%. Assim, a taxa média de ocupação dos dois veículos é de 31,5%.

Para verificar o impacto ambiental do planeamento de rotas, apresentam-se os dados das emissões de CO₂ de cada um dos veículos. O Veículo 1 emite 84,2 kgCO₂ e o Veículo 2 emite 7,7 kgCO₂, o que significa que o Veículo 1 emite mais CO₂ do que o Veículo 2. Isto deve-se ao facto de o Veículo 1 visitar seis clientes, percorrendo maior número de quilómetros do que o Veículo 2.

Por fim, verifica-se que para o planeamento de rotas, com o presente modelo, obtém-se uma solução ótima que percorre 113,4 km.

5.2. Resultados para o 2º Teste

O 2º Teste tem como objetivo verificar qual o impacto nos KPI's quando se alteram os valores das quantidades encomendadas e se aumenta o número de encomendas de uma para duas por cada cliente. O tempo para a obtenção de resultados do 2º Teste, recorrendo ao mesmo *software*, é de cerca de sete segundos. Deste modo, apresenta-se o planeamento de rotas para o presente teste (Figuras 6, 7, 8 e 9).

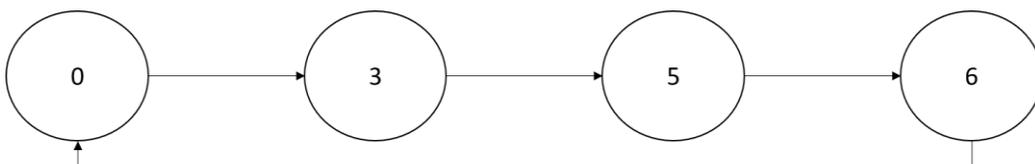


Figura 6 – Rota para o veículo 1 com o 2º Teste.



Figura 7 – Rota para o veículo 2 com o 2º Teste.



Figura 8 – Rota para o veículo 3 com o 2º Teste.

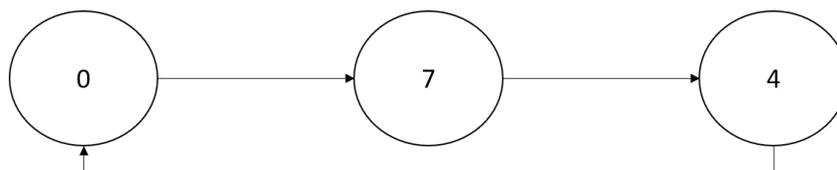


Figura 9 – Rota para o veículo 4 com o 2º Teste.

Por observação das Figuras 6, 7, 8 e 9 verifica-se que o veículo 1 entrega encomendas de três clientes, o veículo 2 e o veículo 3 de um cliente e o veículo 4 de dois clientes.

De seguida, apresentam-se o horário de partida no depósito inicial e as horas em que cada veículo deve efetuar a entrega em cada cliente, respeitando as janelas temporais definidas no Capítulo 4. A Tabela 15 apresenta os horários dos quatro veículos para os sete clientes.

Tabela 15 – Escala horária para todos os veículos no 2º Teste.

| Nó | Horário do veículo 1 [h] | Horário do veículo 2 [h] | Horário do veículo 3 [h] | Horário do veículo 4 [h] |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | 07:15 | 07:15 | 07:15 | 07:15 |

| Nó | Horário do veículo 1 [h] | Horário do veículo 2 [h] | Horário do veículo 3 [h] | Horário do veículo 4 [h] |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | – | 07:34 | – | – |
| 2 | – | – | 07:22 | – |
| 3 | 07:20 | – | – | – |
| 4 | – | – | – | 08:38 |
| 5 | 08:01 | – | – | – |
| 6 | 08:44 | – | – | – |
| 7 | – | – | – | 07:44 |

Através da Tabela 15 verifica-se que os quatro veículos saem do depósito inicial às 7:15 h. O veículo 1 que entrega três encomendas demora cerca de 1,48 h, o veículo 2 que entrega apenas uma encomenda demora cerca de 0,32 h (19 minutos), o veículo 3 que entrega também apenas uma encomenda demora cerca de 0,12 h (7 minutos) e o veículo 4 que entrega duas encomendas demora 1,38 h. Assim, o tempo total gasto na distribuição é de 3,3 h. Posto isto, de forma a confirmar que o modelo exato permite diminuir o KPI referente ao tempo de distribuição em relação ao 1º Teste desenvolvido apresenta-se a Figura 10.

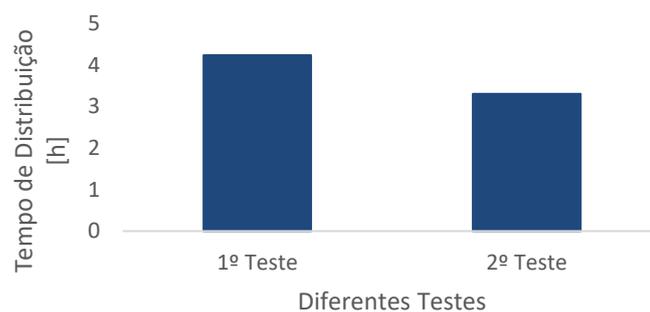


Figura 10 – Tempo de Distribuição no 1º Teste e no 2º Teste.

Através da Figura 10, verifica-se que, no 2º Teste, reduz-se este KPI de 4,23 h para 3,3 h, o que equivale a uma redução de 0,93 h, ou seja, 23,3%.

De seguida, para comparar o KPI referente à taxa de ocupação de cada veículo é apresentada a Tabela 16 que indica a taxa de ocupação de cada compartimento dos quatro veículos.

Tabela 16 – Taxa de ocupação dos veículos no 2º Teste.

| Veículo | Compartimento | Capacidade ocupada [l] | Capacidade máxima [l] | Taxa de ocupação [%] |
|----------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1 | 1300 | 5000 | 26 |
| | 2 | 3500 | 5000 | 70 |
| | 3 | 4200 | 5000 | 84 |
| 2 | 1 | 5000 | 5000 | 100 |
| | 2 | 1500 | 5000 | 30 |
| | 3 | – | 5000 | 0 |
| 3 | 1 | – | 5000 | 0 |
| | 2 | 5000 | 5000 | 100 |
| | 3 | 4200 | 5000 | 84 |
| 4 | 1 | 3700 | 5000 | 74 |
| | 2 | – | 5000 | 0 |
| | 3 | 1600 | 5000 | 32 |

A partir dos dados da Tabela 16, os valores da taxa de ocupação dos veículos 1, 2, 3 e 4 é, em média, de 60%, 43,33%, 61,33% e 35,33%, respetivamente. A taxa média de ocupação dos veículos é cerca de 50%, o que significa que o presente KPI é melhorado do 1º para o 2º Teste.

Para verificar o impacto ambiental do planeamento de rotas, apresentam-se os dados das emissões de CO₂ de cada um dos veículos. Os veículos 1, 2, 3 e 4 emitem 34,4 kgCO₂, 28,4 kgCO₂, 9,9 kgCO₂ e 46,2 kgCO₂, respetivamente, o que significa que o Veículo 4 é o que emite mais CO₂. Isto deve-se ao facto de o Veículo 4 percorrer maior número de quilómetros apesar de não ser o que realiza mais entregas.

Por fim, com o 2º Teste obtêm-se ainda os valores referentes à distância percorrida (Figura 11).

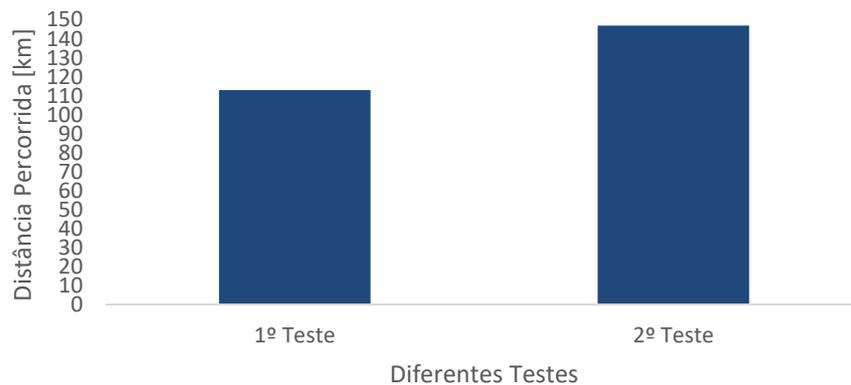


Figura 11 – Distância Percorrida no 1º Teste e no 2º Teste.

Com a Figura 11 verifica-se que no 2º Teste se obtém uma solução ótima que percorre 147 km, não existindo redução em relação ao 1º Teste. No entanto, ao aumentar o número de encomendas e a quantidade encomendada por cada cliente é de esperar também o mesmo aumento em distância percorrida uma vez que se tem que realizar uma melhor gestão das encomendas, a fim de se respeitar as janelas temporais e as capacidades dos compartimentos.

5.3. Resultados para o 3º Teste

O 3º Teste permite analisar o tempo de execução necessário para obter resultados com o modelo exato e saber até quantos clientes é viável a sua utilização. Para isso, recorre-se aos dados apresentados no Anexo B que demonstram as diferenças no número de encomendas por cada cliente e no número de veículos para 5, 10, 15 e 20 clientes, tendo em conta que a quantidade encomendada é sempre 1000 l para cada tipo de produto. Cada uma das situações apresentadas representa um caso distinto. A Figura 12 apresenta os respetivos tempos de execução.

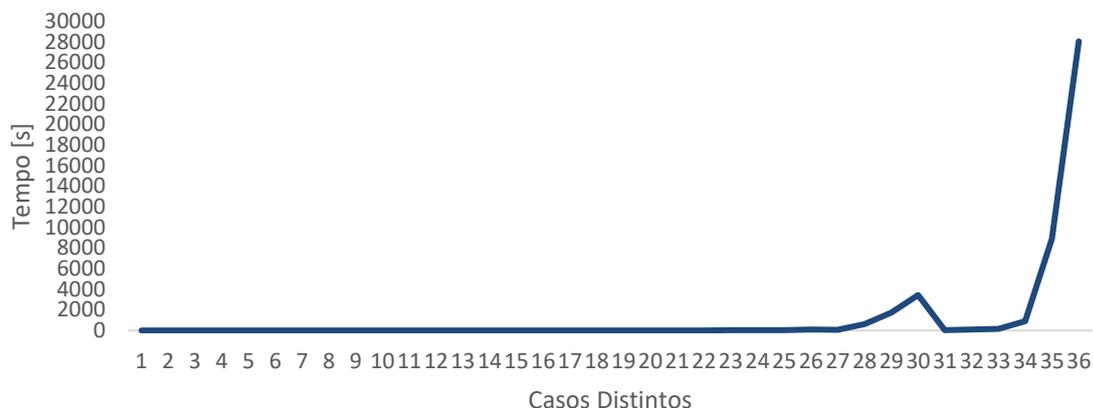


Figura 12 – Evolução do Tempo de Execução.

A partir da Figura 12, verifica-se que o tempo de execução se mantém até aos 2000 segundos (33,3 minutos) até ao Caso 28, a partir deste ponto tem um crescimento, atingindo os 3438, 25 segundos (cerca de 57 minutos) no Caso 30. De seguida, há um decréscimo, no entanto, a partir do Caso 34, volta a aumentar.

Tendo em conta a quantidade de cada encomenda neste teste e a frota ser limitada a 4 veículos, a partir dos 21 clientes e 3 encomendas por cada cliente não é possível obter resultados, uma vez que são excedidas as capacidades dos compartimentos disponíveis. Desta forma, não foram elaborados os testes a partir do Caso 36.

Para se certificar que o modelo exato atinge o objetivo pretendido comparam-se os valores do tempo de distribuição e da distância percorrida com os valores obtidos com o algoritmo heurístico desenvolvido por Pena et al. (2017). Para isso, colocam-se ambas as abordagens nas mesmas circunstâncias, ou seja, para ambas é utilizada a frota apresentada, a velocidade máxima de 55 km/h, a quantidade encomendada por cliente 1000 l e o mesmo conjunto de clientes. No entanto, no desenvolvimento do modelo exato considerou-se o parâmetro referente ao tempo de descanso, de forma a tornar o problema mais real e para aumentar a segurança dos condutores na distribuição de combustível. Assim, a Figura 13 e a Figura 14 apresentam os dados relativos ao tempo total de distribuição com o modelo exato e com o algoritmo heurístico para o Caso 30 e 36, respetivamente.

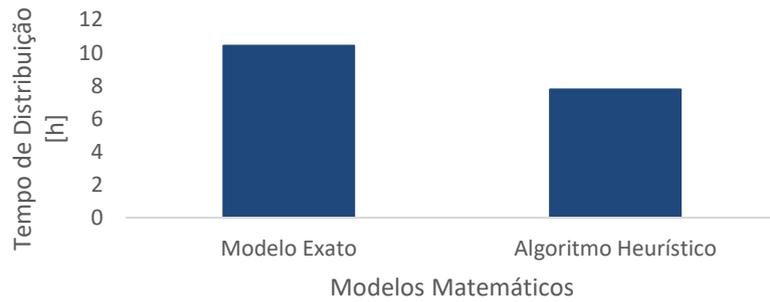


Figura 13 – Tempo de Distribuição nos Modelos Matemáticos para o Caso 30.

Por observação da Figura 13, verifica-se que o tempo de distribuição de combustível, com a utilização do algoritmo heurístico, é cerca de 7,8 h e, com a utilização do modelo exato, cerca de 10,4 h.

No caso 30, com o modelo exato desenvolvido o tempo de distribuição aumenta 2,6 h, no entanto, a segurança dos condutores é garantida uma vez que lhes é permitido parar para descansar.

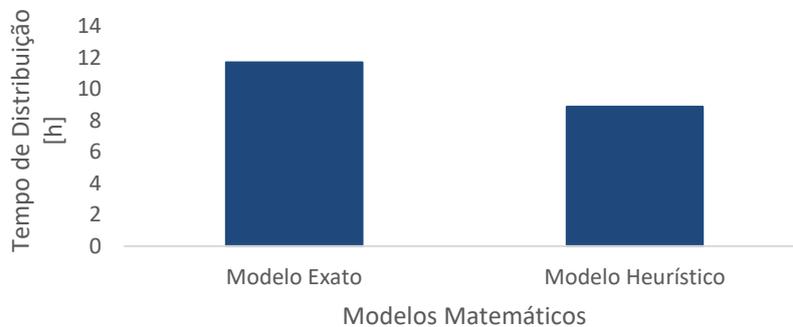


Figura 14 – Tempo de Distribuição nos Modelos Matemáticos para o Caso 36.

Por observação da Figura 14, verifica-se que o tempo de distribuição de combustível, com a utilização do algoritmo heurístico, é cerca de 8,9 h e, com a utilização do modelo exato, cerca de 11,7 h.

No Caso 36, com o modelo exato desenvolvido o tempo de distribuição aumenta 2,8 h, no entanto, a segurança dos condutores é garantida uma vez que lhes é permitido parar para descansar.

Por fim, analisa-se a distância percorrida pelos veículos multi-compartimentados na distribuição de combustível. A Figura 15 e a Figura 16 apresentam os valores obtidos com os dois modelos matemáticos, respetivamente, para o Caso 30 e o Caso 36.

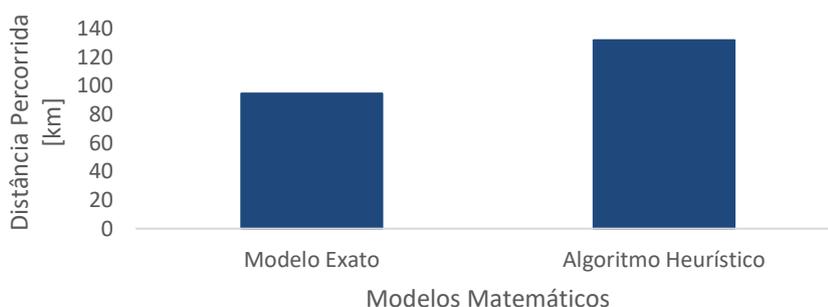


Figura 15 – Distância Percorrida nos Modelos Matemáticos para o Caso 30.

Por observação da Figura 15, verifica-se que com o algoritmo heurístico os veículos percorrem uma maior distância, 132 km, do que com a utilização do modelo exato, onde os veículos percorrem apenas 94,59 km.

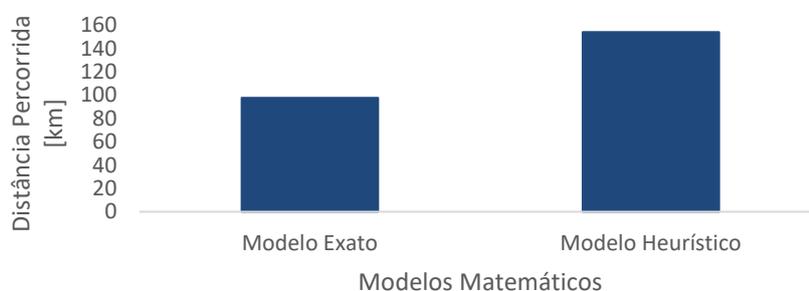


Figura 16 – Distância Percorrida nos Modelos Matemáticos para o Caso 36.

Por observação da Figura 16, verifica-se que com o algoritmo heurístico os veículos percorrem uma maior distância, 154 km, do que com a utilização do modelo exato, onde os veículos percorrem apenas 97,78 km. Deste modo, conclui-se que o modelo exato desenvolvido para o planeamento de rotas para a distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais reduz a distância percorrida para o Caso 30 em 37,41 km e para o Caso 36 em 56,22 km, o que equivale a uma redução de 28,3% e de 36,5%, respetivamente.

6. CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO

O presente estudo de investigação evidencia a complexidade do problema do planeamento de rotas dos veículos das empresas do setor de transporte de mercadorias, em particular, das empresas de transporte de combustível. Em Portugal, as empresas deste setor situam-se maioritariamente nas regiões de Lisboa e Vale do Tejo e do Norte, representando 67% das 8237 empresas. Deste modo, decidiu-se desenvolver um modelo exato para o planeamento de rotas na distribuição de combustível em veículos multi-compartimentados com janelas temporais, de forma a minimizar distâncias e a avaliar o tempo de distribuição e, ainda, o impacto ambiental de cada veículo.

Para o desenvolvimento do modelo matemático, estudou-se detalhadamente os artigos desenvolvidos por El Fallahi et al. (2008) e por Cornillier et al. (2009). Dos seus artigos adaptaram-se restrições adequadas ao problema em estudo e definiram-se, ainda, novas restrições, de forma a considerar o tempo máximo de cada viagem, o tempo de descanso dos condutores, o impacto ambiental de cada veículo e as horas regulares de trabalho. Posto isto, de forma a validar o modelo desenvolvido realizaram-se três testes distintos. O primeiro teste permitiu analisar os valores obtidos para os diferentes KPI's. O segundo teste permitiu analisar o impacto com a alteração de algumas instâncias, mais propriamente, o número de encomendas por cliente e a quantidade por eles encomendada, nos KPI's. A utilização deste conjunto de testes permitiu validar o modelo, uma vez que se obtiveram resultados coerentes. No terceiro teste verificaram-se as limitações do modelo exato, chegando à conclusão de que este pode ser utilizado até aos 20 clientes, 3 encomendas por cada cliente e 4 veículos. Para além disso, permitiu, ainda, avaliá-lo comparando os resultados obtidos com os resultados utilizando o algoritmo heurístico desenvolvido por Pena et al. (2017), recorrendo a instâncias reais.

Deste modo, ao utilizar o modelo exato, em comparação com o algoritmo heurístico, existe um aumento de 2,8 h no que diz respeito ao tempo de distribuição. Este valor era expectável, à priori, uma vez que se introduziu o parâmetro referente ao descanso dos condutores. Assim, apesar de existir esse aumento é garantida a entrega do combustível de forma mais segura tanto para o condutor, como para a empresa. Para além disso, no que

diz respeito à distância percorrida, o presente modelo tinha como objetivo minimizá-la e, essa meta, é conseguida, com uma redução de 36,5%.

O modelo exato desenvolvido foi utilizado na distribuição de combustível, no entanto, pode ser adaptado para o transporte de outras mercadorias líquidas perigosas, como por exemplo o transporte de tintas (IMT, 2017).

Para o desenvolvimento do presente estudo de investigação, a maior limitação enfrentada foi o desconhecimento do *software* utilizado para programar o modelo, o que levou a um longo período de aprendizagem. Para além disso, consideram-se como limitações do modelo o facto de a velocidade média ser igual para todos os veículos, o estudo ser realizado utilizando uma frota homogénea e apenas se ter em conta as emissões de CO₂ para o cálculo das emissões de GEE para provar a sustentabilidade dos veículos.

Concluindo, para colmatar estas limitações sugere-se como trabalho futuro, um estudo que recaia sobre o mesmo tipo de problema, no entanto, que considere diferentes velocidades médias para os veículos e uma frota heterogénea, e ainda, que se considerem emissões de outros gases poluentes no cálculo das emissões de GEE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avella, P., Boccia, M., & Sforza, A. (2004). Solving a fuel delivery problem by heuristic and exact approaches. *European Journal of Operational Research*, 152(1), 170–179. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00676-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00676-8)
- Banco de Portugal. (2019). “Setor da Atividade Económica : 49410 - Transportes Rodoviários de Mercadorias”. Acedido a 25 de junho de 2020, em <https://www.bportugal.pt/>
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232–1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- Brown, G. G., & Graves, G. W. (1981). Real-Time Dispatch of Petroleum Tank Trucks. *Management Science*, 27(1), 19–32.
- Carvalho, R. H. de C. D. de. (2014). “Metodologia de Cálculo de Consumos de Combustível e Emissões de Poluentes Baseada em Perfis de Condução.” Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). Vehicle routing problems for city logistics. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), 51–79. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>
- Comissão Europeia. (2019). “Estatísticas explicadas - Setor de Transporte Rodoviário de Mercadorias.” Acedido a 25 de junho de 2020, em <https://ec.europa.eu/>
- Cornillier, F., Boctor, F. F., Laporte, G., & Renaud, J. (2008a). A heuristic for the multi-period petrol station replenishment problem. *European Journal of Operational Research*, 191(2), 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.016>
- Cornillier, F., Boctor, F. F., Laporte, G., & Renaud, J. (2008b). An exact algorithm for the petrol station replenishment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 59(5), 607–615. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602374>
- Cornillier, F., Boctor, F., & Renaud, J. (2012). Heuristics for the multi-depot petrol station replenishment problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 220(2), 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.02.007>
- Cornillier, F., Laporte, G., Boctor, F. F., & Renaud, J. (2009). The petrol station replenishment problem with time windows. *Computers and Operations Research*, 36(3), 919–935. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.11.007>
- Decreto-Lei n.º 117/2012 de 5 de junho do Ministério da Economia e do Emprego. , Pub. L. No. Diário da República: Série I, n.º 109 (2012).
- Decreto-lei n.º 44/2005 de 23 de fevereiro do Ministério da Administração Interna. , Pub. L.

- No. Diário da República: Série I-A, n.º38 (2005).
- Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics - An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
- Drexler, M. (2012). Rich vehicle routing in theory and practice. *Logistics Research*, (5), 47–63.
- Dukkanci, O., Kara, B. Y., & Bektaş, T. (2019). The green location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 105, 187–202. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.011>
- El Fallahi, A., Prins, C., & Wolfler Calvo, R. (2008). A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 35(5), 1725–1741. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.10.006>
- Harrison, T. P. (2005). Principles for the Strategic Design of Supply Chains. In *The Practice of Supply Chain Management: Where Theory and Application Converge*. https://doi.org/10.1007/0-387-27275-5_1
- Hasle, G., & Kloster, O. (2007). Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization. In *Operations Research Computer Science Interfaces* (pp. 397–436). Springer.
- IMT. (2017). “Transportes Rodoviários. Mercadorias Perigosas. Regulamentação Técnica. Acordo ADR Parte 2: Classificação.” Acedido em 29 de junho de 2020, em <http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/>
- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland Report: “Our Common Future.” *Medicine and War*, 4(1), 17–25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.09.008>
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 65–83.
- Laporte, G. (1987). *Location-routing problems*. Montreal.
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J., & Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 285–300.
- Lee, H. L. (2002). Aligning supply chain strategies with product uncertainties. In *IEEE Engineering Management Review* (Vol. 44). <https://doi.org/10.1109/emr.2003.1207060>

- Lei N.º 7/2009, de 12 fevereiro da Assembleia da República. , Pub. L. No. Diário da República: Série I, n.º30 (2009).
- Lei n.º72/2013 de 3 de setembro de 2013 da Assembleia da República. , Pub. L. No. Diário da República: Série I, n.º169 (2013).
- Ng, W. L., Leung, S. C. H., Lam, J. K. P., & Pan, S. W. (2008). Petrol delivery tanker assignment and routing: A case study in Hong Kong. *Journal of the Operational Research Society*, 59(9), 1191–1200. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602464>
- Oliver, J. (2013). Distribution System Modeling and Analysis. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pena, C., Pinto, T., & Carvalho, M. S. (2017). CIE47 Proceedings, 11-13 October 2017, Lisbon / Portugal. (October), 11–13.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *Monographs on Discrete Mathematics and Applications. In The Vehicle Routing Problem*. Siam.
- Transporte de Combustíveis. (2019). Acedido a 12 de julho de 2020, em <https://empresite.jornaldenegocios.pt/Actividade/TRANSPORTE-DE-COMBUSTIVEIS/>
- Transportes Rodoviários de Mercadorias e Atividades de Mudanças. (2019). Acedido a 12 de julho de 2020, em https://infoempresas.jn.pt/H494_TRANSPORTES-RODOVIARIOS-MERCADORIAS-ATIVIDADES-MUDANCAS.html

ANEXO A – MATRIZ DE DISTÂNCIAS

- 1º Teste e 2º Teste:

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | X | 17,57 | 6,12 | 4,69 | 8,30 | 8,75 | 19,95 | 26,92 |
| 1 | 17,46 | X | 23,19 | 19,97 | 17,81 | 24,61 | 35,28 | 19,25 |
| 2 | 6,10 | 23,28 | X | 7,48 | 10,62 | 4,37 | 15,04 | 32,09 |
| 3 | 4,78 | 20,20 | 7,33 | X | 13,09 | 5,86 | 16,86 | 31,71 |
| 4 | 8,31 | 17,91 | 10,40 | 13,00 | X | 14,11 | 23,21 | 21,99 |
| 5 | 8,84 | 24,65 | 4,41 | 5,91 | 14,10 | X | 11,78 | 35,58 |
| 6 | 20,08 | 35,86 | 14,98 | 17,22 | 23,21 | 12,24 | X | 44,10 |
| 7 | 27,01 | 19,04 | 31,81 | 31,70 | 21,82 | 35,51 | 43,98 | X |

- 3º Teste:

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|----|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 0 | X | 10,30 | 15,8 | 3,8 | 2,7 | 1,9 | 9 | 4,63 | 1 | 0,25 | 4,7 | 4,43 | 1,48 | 0,52 | 13,6 | 23 | 12,1 | 0,78 | 3,89 | 3,84 | 4,85 |
| 1 | 10,5 | X | 7,8 | 6,6 | 8,6 | 8,8 | 6,5 | 11,7 | 10,9 | 10,4 | 10,8 | 6,35 | 11,2 | 10,5 | 22,5 | 13 | 2,91 | 10,9 | 6,42 | 9,2 | 14,1 |
| 2 | 15,6 | 7,70 | X | 13,2 | 15,1 | 15 | 14,2 | 18,5 | 16,5 | 15,8 | 20,1 | 13 | 17 | 16,1 | 29,1 | 12,7 | 4,76 | 16,1 | 12,7 | 16,7 | 20,3 |
| 3 | 3,9 | 6,70 | 13,3 | X | 2 | 2,2 | 5,5 | 5,35 | 4,33 | 4,04 | 7,47 | 0,39 | 4,58 | 4,1 | 16,1 | 19,3 | 8,95 | 4,68 | 0,596 | 4,73 | 7,5 |
| 4 | 2,6 | 8,70 | 15,2 | 2,1 | X | 1 | 6,3 | 3,46 | 2,82 | 2,84 | 5,5 | 2,26 | 2,93 | 2,72 | 14,1 | 21,1 | 10,9 | 3,56 | 2,42 | 4,2 | 5,51 |
| 5 | 1,8 | 8,90 | 15,2 | 2,3 | 0,9 | X | 7,1 | 3,94 | 2,14 | 2,02 | 5,31 | 2,57 | 2,38 | 2 | 14,2 | 21,5 | 11 | 2,73 | 2,43 | 5,1 | 5,42 |
| 6 | 8,9 | 6,60 | 14,7 | 5,3 | 6,3 | 7,4 | X | 7,62 | 9,04 | 9,08 | 10,9 | 5,11 | 9,13 | 9 | 17,8 | 16,2 | 9,46 | 9,8 | 5,87 | 3,7 | 10,9 |
| 7 | 4,61 | 11,65 | 18,6 | 5,43 | 3,5 | 3,98 | 7,6 | X | 3,84 | 4,5 | 3,41 | 5,55 | 3,48 | 4,17 | 10,8 | 23,6 | 14,2 | 5 | 5,85 | 4,15 | 3,28 |
| 8 | 1,02 | 10,80 | 16,5 | 4,3 | 2,84 | 2,14 | 9,08 | 3,88 | X | 0,8 | 3,65 | 4,72 | 0,45 | 0,79 | 12,8 | 23,6 | 12,8 | 1,22 | 1,22 | 6,61 | 3,83 |
| 9 | 0,26 | 10,35 | 15,9 | 4 | 2,8 | 2,05 | 9 | 4,6 | 0,83 | X | 4,43 | 4,43 | 1,22 | 0,32 | 13,5 | 23,2 | 12,2 | 0,75 | 4,06 | 6,9 | 4,65 |
| 10 | 4,8 | 10,90 | 20 | 7,46 | 5,6 | 5,32 | 11 | 3,4 | 3,66 | 4,41 | X | 7,74 | 3,26 | 4,13 | 9,13 | 26,6 | 16,3 | 4,44 | 7,73 | 7,61 | 0,309 |
| 11 | 4,4 | 6,32 | 12,8 | 0,4 | 2,32 | 2,6 | 5,1 | 5,53 | 4,7 | 4,45 | 7,73 | X | 4,95 | 4,46 | 16,4 | 18,9 | 8,72 | 5,1 | 0,791 | 4,6 | 7,79 |
| 12 | 1,5 | 11,00 | 17,2 | 4,6 | 3 | 2,4 | 9,1 | 3,49 | 0,46 | 1,27 | 3,2 | 4,94 | X | 0,92 | 12,4 | 23,9 | 13,2 | 1,6 | 4,74 | 6,5 | 3,4 |
| 13 | 0,56 | 10,40 | 16 | 4,3 | 2,7 | 1,96 | 9,1 | 4,5 | 0,82 | 0,4 | 4,13 | 4,47 | 0,9 | X | 13,2 | 23,3 | 12,4 | 0,92 | 16,5 | 6,7 | 4,33 |
| 14 | 13,60 | 22,40 | 29 | 16,2 | 14 | 14,1 | 18 | 10,5 | 12,9 | 13,4 | 9,1 | 16,6 | 12,5 | 13,1 | X | 34 | 25 | 13,5 | 16,5 | 14,1 | 8,95 |
| 15 | 22,9 | 13,2 | 12,9 | 19,5 | 20 | 21 | 16,7 | 23,8 | 23 | 23,5 | 26,4 | 18,7 | 24 | 23,1 | 34,1 | X | 12,2 | 23,8 | 19,2 | 19,9 | 26,2 |
| 16 | 12 | 2,93 | 4,8 | 9 | 11 | 10,8 | 9,5 | 14,3 | 13 | 12 | 16,1 | 8,7 | 13,4 | 12,6 | 25,1 | 12,1 | X | 12,6 | 8,54 | 12 | 12 |
| 17 | 0,8 | 11 | 16 | 4,7 | 4,54 | 2,7 | 10 | 5,1 | 1,2 | 0,77 | 4,48 | 5 | 1,8 | 0,9 | 13,3 | 23,7 | 12,65 | X | 4,6 | 7,64 | 7,6 |
| 18 | 3,9 | 6,4 | 12,5 | 0,6 | 2,5 | 2,4 | 5,85 | 5,9 | 1,2 | 4 | 7,7 | 0,9 | 4,7 | 16,6 | 16,4 | 19,3 | 8,6 | 4,5 | X | 5,37 | 5,35 |
| 19 | 3,8 | 9,1 | 16,8 | 4,8 | 4,3 | 5 | 3,9 | 4,2 | 6,6 | 7 | 7,5 | 4,5 | 6,8 | 6,9 | 13,9 | 19,6 | 11,8 | 7,75 | 5,4 | X | 7,45 |
| 20 | 4,9 | 14 | 20,5 | 7,3 | 5,5 | 5,4 | 11 | 3,3 | 3,9 | 4,6 | 0,4 | 7,8 | 3,5 | 4,3 | 9 | 26,1 | 12,3 | 7,7 | 5,3 | 7,5 | X |

ANEXO B – DADOS PARA O TEMPO DE EXECUÇÃO

| Caso | Nº de Clientes | Nº de Encomendas por Cliente | Nº de Veículos | Nº de Restrições | Nº de Variáveis | Nº de Iterações | Distância Percorrida [km] | Tempo de Execução [s] |
|------|----------------|------------------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|
| 1 | 5 | 1 | 1 | 112 | 63 | 35 | 34,9 | 4,30 |
| 2 | | | 2 | 209 | 126 | 835 | | 4,49 |
| 3 | | | 3 | 306 | 189 | 510 | | 4,79 |
| 4 | | | 4 | 403 | 252 | 966 | | 4,93 |
| 5 | | 2 | 1 | 112 | 63 | 35 | | 4,61 |
| 6 | | | 2 | 209 | 126 | 835 | | 4,88 |
| 7 | | | 3 | 306 | 189 | 510 | | 5,20 |
| 8 | | | 4 | 403 | 252 | 966 | | 5,09 |
| 9 | | 3 | 1 | 112 | 63 | 35 | | 4,32 |
| 10 | | | 2 | 209 | 126 | 835 | | 4,39 |
| 11 | | | 3 | 306 | 189 | 510 | | 4,43 |
| 12 | | | 4 | 403 | 252 | 966 | | 5,13 |
| 13 | 10 | 1 | 1 | 317 | 173 | 99 | 48,13 | 4,95 |
| 14 | | | 2 | 604 | 346 | 25273 | | 5,91 |
| 15 | | | 3 | 891 | 519 | 12487 | | 6,44 |
| 16 | | | 4 | 1178 | 692 | 48833 | | 7,07 |
| – | | 2 | 1 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) |
| 17 | | | 2 | 604 | 346 | 109477 | 52,81 | 9,23 |
| 18 | | | 3 | 891 | 519 | 56649 | | 12,19 |
| 19 | | | 4 | 1178 | 692 | 74646 | | 10,90 |
| – | | 3 | 1 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) |
| 20 | | | 2 | 604 | 346 | 52178 | 53,53 | 7,55 |
| 21 | | | 3 | 891 | 519 | 53051 | | 9,97 |
| 22 | | | 4 | 1178 | 692 | 88679 | | 9,50 |
| – | 15 | 1 | 1 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) |
| 23 | | | 2 | 1199 | 666 | 249698 | 83,16 | 18,91 |

| Caso | Nº de Clientes | Nº de Encomendas por Cliente | Nº de Veículos | Nº de Restrições | Nº de Variáveis | Nº de Iterações | Distância Percorrida [km] | Tempo de Execução [s] | |
|------|----------------|------------------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|--------|
| 24 | 20 | | 3 | 1776 | 999 | 471219 | | 32,87 | |
| 25 | | | 4 | 2353 | 1332 | 306241 | | 24,72 | |
| – | | | 2 | 1 | (a) | (a) | | (a) | (a) |
| 26 | | | | 2 | 1199 | 666 | | 48927 | 87 |
| 27 | | 3 | | 1776 | 999 | 702346 | 65,46 | | |
| 28 | | 4 | | 2353 | 1332 | 5493521 | 612,03 | | |
| – | | 3 | 1 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) | |
| – | | | 2 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) | |
| 29 | | | 3 | 1776 | 999 | 27174164 | 94,59 | 1748,37 | |
| 30 | | | 4 | 2353 | 1332 | 53833200 | | 3438,25 | |
| – | | 20 | 1 | 1 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) |
| 31 | | | | 2 | 1994 | 1086 | 481747 | 85,875 | 47,67 |
| 32 | | | | 3 | 2961 | 1629 | 1155072 | | 102,65 |
| 33 | | | | 4 | 3928 | 2172 | 1641255 | | 170,10 |
| – | | | 2 | 1 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) |
| – | | | | 2 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) |
| 34 | 3 | | | 2961 | 1629 | 19773423 | 91,515 | 908,14 | |
| 35 | 4 | | | 3928 | 2172 | 72681394 | | 8880,44 | |
| – | 3 | | 1 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) | |
| – | | | 2 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) | |
| – | | | 3 | (a) | (a) | (a) | (a) | (a) | |
| 36 | | | 4 | 3928 | 2172 | 269092131 | 97,775 | 28059,70 | |

(a) As quantidades encomendadas excedem as capacidades dos compartimentos.