



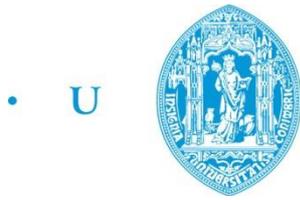
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Ana Cláudia dos Santos Pereira

**UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O
PLANEAMENTO DE ROTAS COM PREOCUPAÇÕES
AMBIENTAIS**

**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 Universidade de Coimbra.**

Julho de 2020



• U C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Um sistema de apoio à decisão para o planeamento de rotas com preocupações ambientais

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

A decision support system for the vehicle routing problem with environmental concerns

Autor

Ana Cláudia dos Santos Pereira

Orientador

Telmo Miguel Pires Pinto

Júri

Presidente

Professor Doutor Cristóvão Silva

Professor Auxiliar Com Agregação da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor Cláudio Manuel Martins Alves

Professor Catedrático da Universidade do Minho

Orientador

Professor Doutor Telmo Miguel Pires Pinto

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2020

All our dreams can come true if we have the courage to pursue them.

Walt Disney

À minha família.

Agradecimentos

O presente documento é o culminar de 5 anos de muito esforço e dedicação e não seria possível sem o contributo de várias pessoas.

Começo por agradecer à minha família, especialmente aos meus pais e à minha irmã, por todo o apoio incondicional e por terem estado lá para mim sempre que necessitei.

Não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor Telmo Miguel Pires Pinto pela dedicação e pelo apoio ao longo destes últimos meses.

Um especial obrigada ao João pela paciência e por nunca ter deixado de acreditar em mim.

Às minhas queridas amigas, Maria, Rita e Ana, um obrigada pelo apoio ao longo desta etapa e pela entajuda, sem elas a realização deste documento teria sido bastante difícil.

À Carolina pelas conversas incansáveis e por ter sempre uma palavra de apoio e encorajamento para me dar.

Por fim, a todos os meus amigos que apesar de não estarem aqui mencionados tiveram um papel fulcral para o desenvolvimento desta dissertação.

Resumo

A crescente preocupação com os fatores ambientais fez com que existisse uma maior consciencialização por parte das organizações. Contudo, apesar dos protocolos que têm vindo a ser assinados, continuam a ser emitidas grandes quantidades de gases efeito estufa sendo que o setor dos transportes é um dos principais contribuidores.

Com o intuito de auxiliar as empresas num planeamento de rotas mais verde, e tendo em consideração as emissões de gases de efeito de estufa, foi implementado um sistema de apoio à decisão que elabora o planeamento das rotas com janelas temporais em frota heterogénea. Nesse sentido, foi feita uma adaptação do problema denominado na literatura por *Pollution-Routing Problem*. Foram utilizados métodos de solução existentes na literatura, nomeadamente heurísticas para permitirem a obtenção de relativamente boas soluções num curto período de tempo.

Para a obtenção de resultados utilizaram-se dados relativos a um problema real de uma organização de distribuição retalhista e procedeu-se à comparação do problema clássico de planeamento de rotas com o *Pollution-Routing Problem*, através de duas funções de cariz ambiental que pretendem minimizar os custos totais e a energia despendida. Os resultados obtidos estimam uma redução de cerca de 14% da quantidade de CO₂ com a função desenvolvida que pretende minimizar os custos totais, comprometendo ligeiramente a distância total percorrida. Relativamente à comparação entre as duas adaptações do *Pollution-Routing Problem*, foi possível verificar que a função de cariz ambiental que pretende minimizar a energia despendida apresenta uma quantidade de CO₂ libertado menor em cerca de 5%, não comprometendo a distância a percorrer.

Palavras-chave: *Pollution-Routing Problem*, Emissões de Gases Efeito Estufa, Sistema de Apoio à Decisão

Abstract

The growing concern with environmental factors has led to a greater awareness on the part of organizations. However, despite the protocols that have been signed, large quantities of greenhouse gases continue to be emitted and the transport sector is a major contributor.

In the interests of endorsing companies in a greener route planning, and taking into account greenhouse gas emissions, a decision support system has been implemented that elaborates the planning of routes with heterogeneous fleet time windows. In this sense, an adaptation of the problem called in the literature by Pollution-Routing Problem was made. Existing solution methods in the literature have been used, in particular heuristics, to allow relatively good solutions to be obtained in a short period of time.

In order to obtain results, data on a real problem of a retail distribution organisation was used and the classic Vehicle Routing Problem was compared with the Pollution-Routing Problem, through two environmental functions that aim at minimizing total costs and energy expended. The results obtained estimate a reduction of about 14% of the amount of CO₂ with the function developed that aims to minimize total costs, slightly compromising the total distance travelled. Regarding the comparison between the two Pollution-Routing Problem adaptations, it was possible to verify that the environmental function that intends to minimize the energy spent presents an amount of released CO₂ lower by about 5%, not compromising the distance to be travelled.

Keywords Pollution-Routing Problem, Greenhouse Gas Emissions, Decision Support System

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia de Investigação	2
1.4. Estrutura da dissertação	2
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	5
2.1. <i>Green Supply Chain</i>	5
2.2. <i>Vehicle Routing Problem (VRP)</i>	5
2.3. <i>Pollution-Routing Problem (PRP)</i>	7
2.4. Variantes do <i>Vehicle Routing Problem</i>	7
2.4.1. <i>Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)</i>	7
2.4.2. <i>Green Vehicle Routing Problem (GVRP)</i>	8
2.4.3. <i>Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)</i>	8
2.4.4. <i>Multi-Trip Vehicle Routing Problem (MTVRP)</i>	9
2.4.5. <i>Multi-Compartment Vehicle Routing Problem (MCVRP)</i>	9
2.5. Modelos de consumo de combustível	10
2.5.1. Modelos Macroscópicos	11
2.5.2. Modelos Microscópicos	13
2.6. Métodos de Solução	15
2.6.1. Abordagem exata	16
2.6.2. Heurísticas	16
3. PROBLEMA DE PLANEAMENTO DE ROTAS	21
3.1. Formulação do Problema	21
3.2. Adaptações do problema e do sistema de apoio à decisão	23
3.3. Métodos de Solução	27
3.4. Sistema de Apoio à Decisão	28
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	39
4.1. Resultados obtidos	39
5. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO	53
5.1. Conclusão	53
5.2. Trabalho Futuro	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Exemplo de VPR (Fonte: Kabadurmuş, Erdoğan, Özkan, e Köseoğlu, (2019)).	6
Figura 2.2. Exemplo das variantes VRPTW e MTVRP (Fonte: Sun, Wang, Lang, & Zhou (2019))	9
Figura 2.3. Fatores que influenciam o consumo de combustível (baseado em Zhou, Jin, & Wang (2016))	10
Figura 2.4. Comparação da relação entre a velocidade e o consumo de combustível no modelo MEET e CMEM (Fonte: Eglese e Bektaş (2014))	15
Figura 2.5. Cenários existentes para o cálculo das poupanças do Algoritmo de Clarke e Wright (1964)	17
Figura 3.1. Resumo do processo de planeamento.	24
Figura 3.2. Menu Inicial.	29
Figura 3.3. Página relativa à opção “Novo Planeamento”.	30
Figura 3.4. Formulário para a escolha do armazém.	30
Figura 3.5. Formulário para a introdução da encomenda.	31
Figura 3.6. Página relativa à disponibilidade dos veículos.	32
Figura 3.7. Informação adicionada relativa ao planeamento.	32
Figura 3.8. Página relativa à opção “Finalizar Planeamento”.	33
Figura 3.9. Opção “Visualização da(s) rota(s)”.	34
Figura 3.10. Página relativa à opção “Adicionar Veículo”.	35
Figura 3.11. Formulário para a introdução de veículos.	36
Figura 3.12. Página relativa à opção “Adicionar Cliente”	36
Figura 3.13. Formulário a ser preenchido com os dados do cliente	37
Gráfico 4.1 Comparação dos resultados obtidos considerando ou não a opção <i>multi trip</i> .	41
Gráfico 4.2. Comparação das duas funções com a opção <i>Multi Trip</i> .	44
Gráfico 4.3. Comparação entre diferentes velocidades.	46
Gráfico 4.4. Comparação entre diferentes velocidades.	47
Gráfico 4.5. Resultados obtidos das funções de cariz ambiental.	49
Gráfico 4.6. Comparação entre as três funções apresentadas.	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Parâmetros das emissões usados no modelo MEET (Fonte: Adaptado de Bektaş et al.(2015))	12
Tabela 2.2. Conjunto de dados amostra para o modelo COPERT (Fonte: Adaptado de Bektaş et al.(2015))	12
Tabela 2.3. Métodos utilizados por diferentes autores (baseado em Dukkanci, Kara e Bektaş (2019))	15
Tabela 3.1. Incumprimentos que poderão surgir e as suas possíveis soluções.....	25
Tabela 3.2. Variáveis necessárias para o cálculo dos custos totais.	26
Tabela 4.1. Valores obtidos com e sem opção <i>Multi Trip</i> para a função desenvolvida.	41
Tabela 4.2. Consumos de combustível dos veículos pertencentes à frota por cada cem quilómetros	42
Tabela 4.3. Resultados obtidos relativamente ao modelo Vehicle Routing Problem.....	43
Tabela 4.4. Resultados obtidos relativamente à função desenvolvida no presente documento.	43
Tabela 4.5. Valores por cada 1000 km nos dois modelos.	45
Tabela 4.6. Resultados obtidos relativamente à velocidade média de 50 km/h no modelo desenvolvido.....	45
Tabela 4.7. Valores por cada 1000 km consoante a velocidade média.	47
Tabela 4.8. Resultados obtidos da função que visa minimizar a energia.	48
Tabela 4.9. Valores por cada 1000 km consoante a função de cariz ambiental.	50
Tabela 4.10. Comparação das três funções.....	51
Tabela 0.1. Plano de entregas número 1.....	61
Tabela 0.2. Plano de entregas número 2.....	61
Tabela 0.3. Plano de entregas número 3.....	62
Tabela 0.4. Plano de entregas número 4.....	62
Tabela 0.5. Plano de entregas número 5.....	62

SIGLAS

VRP – *Vehicle Routing Problem*

PRP – *Pollution-Routing Problem*

SGC – *Green Supply Chain*

GEE – *Gases de Efeito de Estufa*

CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem*

GVRP – *Green Vehicle Routing Problem*

VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

MTVRP – *Multi-Trip Vehicle Routing Problem*

MCVRP – *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem*

MEET – *Methodology for Calculating Transportation Emissions and Energy*

Consumption

COPERT – *Computer Programme to Calculate Emissions from Road*

Transportation

CMEM - *Comprehensive Modal Emissions Modeling*

CPU – *Central Processing Unit*

TS – *Tabu Search*

LNS – *Large Neighbourhood Search*

VBA – *Visual Basic for Applications*

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo encontram-se evidenciados os fatores que motivaram esta investigação, assim como os principais objetivos. De seguida, é apresentada a metodologia a adotar e a estrutura da dissertação.

1.1. Motivação

O setor dos transportes é fundamental para o bom funcionamento de um país, uma vez que torna possível a mobilidade tanto de pessoas, como de diferentes bens. Contudo, de acordo com a EEA (2019), um terço da energia final consumida na União Europeia deve-se aos transportes, sendo que grande parte desta energia provém de fontes de energia não renováveis. Consequentemente, são emitidas grandes quantidades de gases de efeito de estufa (GEE) que contribuirão negativamente para o futuro das gerações. Com o intuito de atenuar os impactos causados pelos diferentes setores, incluindo o setor dos transportes, vários acordos e protocolos têm vindo a ser assinados nos últimos anos por diversos países. Apesar destas medidas terem levado a uma diminuição da poluição atmosférica, as concentrações de GEE continuam demasiado elevadas. Assim sendo, as organizações devem tomar medidas que diminuam as emissões, tal como o uso de transportes menos poluentes, a utilização de tecnologias mais limpas, entre outras.

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão orientado para as empresas, independentemente da indústria onde estas se inserem e do tipo de mercadoria que possam transportar. Este sistema permitirá o planeamento das rotas que os veículos terão de efetuar, tendo em conta não só a distância a percorrer, como também as implicações ambientais incorridas.

1.3. Metodologia de Investigação

O problema de planeamento de rotas trata-se de um problema de investigação operacional e como tal, é necessário recorrer a uma metodologia do mesmo tipo.

De acordo com Carvalho (2014), a Metodologia de Investigação Operacional engloba as seguintes fases:

1. Formulação do problema;
2. Construção de um modelo matemático;
3. Obtenção de uma solução;
4. Validação do modelo e análise dos resultados obtidos;
5. Implementação do modelo.

A primeira fase, formulação do problema, engloba a identificação do mesmo, que neste caso em específico, é um problema abordado constantemente, uma vez que cada vez mais somos confrontados com as consequências inerentes ao uso excessivo dos meios de transporte poluentes. Para além disso, é nesta fase que são definidos os objetivos, assim como as variáveis e parâmetros necessários.

Realizada a formulação do problema, é necessária uma recolha e análise dos dados, sendo que a informação utilizada neste documento diz respeito a um problema real cujos dados foram ligeiramente alterados por questões de confidencialidade.

Na segunda fase, construção de um modelo matemático, é definida a função objetivo, assim com as relações existentes entre as diferentes variáveis.

Na terceira e quarta fase, obtenção de uma solução e validação do modelo e análise dos resultados obtidos, respetivamente, são obtidas soluções que serão analisadas tendo em conta os dados obtidos na recolha inicial.

Assim que o modelo se encontra validado, procede-se à última fase, Implementação do modelo, onde o modelo poderá ser usado como uma ferramenta de planeamento.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo este o capítulo introdutório onde se encontra resumido o conteúdo do documento.

No segundo capítulo é apresentado o enquadramento teórico relativamente ao *Vehicle Routing Problem* (VRP) e as suas variantes, nomeadamente o *Pollution-Routing Problem* (PRP), com o intuito de uma melhor compreensão do que será abordado no decorrer do documento.

No terceiro capítulo encontra-se a formulação do problema, assim como a explicação do modelo de apoio à decisão desenvolvido.

No quarto capítulo exibem-se os resultados obtidos, assim como a sua discussão.

No quinto e último capítulo apresentam-se as considerações finais assim como os aspetos a desenvolver no futuro.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

O conceito de *Vehicle Routing Problem* foi introduzido, pela primeira vez, no século XX, surgindo inúmeros estudos nos anos seguintes. Como tal, é necessário adequar a pesquisa ao problema vivido atualmente. Assim sendo, o início da pesquisa assentou na variante *Pollution-Routing Problem*, dado que existe uma crescente preocupação com os fatores ambientais na sociedade em que vivemos.

Neste sentido, é dado ênfase às variantes que foram surgindo, relacionadas com janelas temporais, capacidade da frota, veículos multi-compartimentados, entre outros. Para além disso, são ainda analisados modelos de consumo de combustível por parte das viaturas, uma vez que este consumo está diretamente relacionado com as emissões de CO₂ resultantes.

2.1. Green Supply Chain

Segundo Srivastava (2007), a Green Supply Chain (GSC) considera o pensamento ambiental com o da gestão da cadeia de abastecimento convencional, desde o design do produto, origem e seleção dos materiais e dos fornecedores, os processos de transformação, entrega dos produtos finais aos consumidores e gestão do fim da vida útil dos produtos. Ao incluir esta componente verde, a GSC pretende diminuir o impacto ecológico que a cadeia de abastecimento irá provocar nas futuras gerações. Diminuição essa que irá recorrer ao uso de materiais e tecnologias apropriadas.

2.2. Vehicle Routing Problem (VRP)

O *Vehicle Routing Problem* é um dos problemas centrais no que diz respeito ao transporte de mercadorias. Este conceito, foi introduzido pela primeira vez por Dantzig e Ramser (1959) e consiste na projeção de rotas e entregas ideais para um conjunto de veículos de um ponto central até aos diversos clientes que se encontram dispersos, através da minimização da distância total percorrida pelos veículos ou da minimização dos custos totais associados. Estas entregas serão realizadas por um conjunto de veículos pertencente a uma frota homogénea.

O problema de rotas clássico assume que os veículos possuem uma capacidade de depósito infinita e que a quantidade de combustível existente no depósito é sempre suficiente para servir os clientes, independentemente da rota traçada (Koç e Karaoglan, 2016).

Trata-se de um problema fundamental, uma vez que afetará não só os custos de entrega bem como os efeitos ambientais.

A Figura 2.1 evidencia um exemplo do VRP, onde os pontos a preto correspondem aos locais de entrega que farão parte das rotas projetadas- Como é possível verificar, todas as rotas iniciam e terminam no mesmo local.

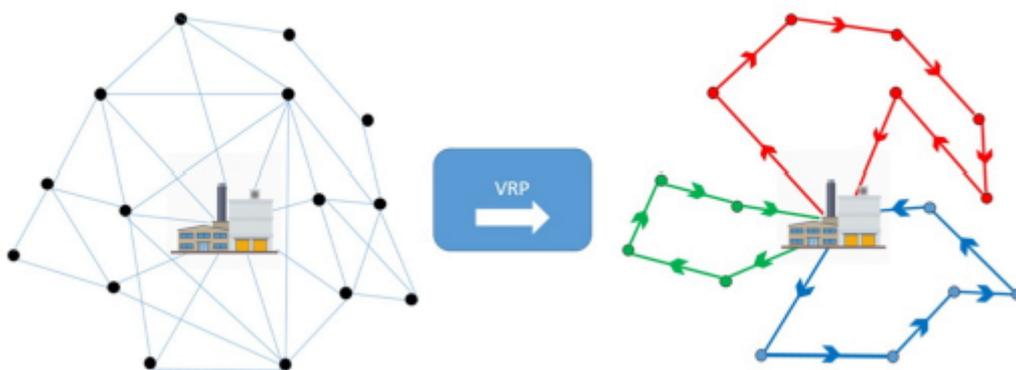


Figura 2.1. Exemplo de VPR (Fonte: Kabadurmuş, Erdoğan, Özkan, e Köseoğlu, (2019))

Este problema poderia ser resolvido através da obtenção de todas as soluções possíveis, sendo que a solução que apresentasse menor custo seria guardada. Contudo, este método torna-se impraticável se o número de soluções for muito elevado. Assim, devido à sua elevada complexidade, o VRP é considerado um problema *Nondeterministic Polynomial-time hard*, uma vez que a sua realização não é possível num período de tempo aceitável.

Desde a sua introdução, este conceito tem vindo a ser estudado por diversos autores, sendo que o principal fator que motivou a realização destes estudos é o facto de a indústria dos transportes apresentar diversos impactos negativos tanto ao nível ambiental como da saúde humana, entre outros. Um desses estudos foi realizado por Clarke e Wright (1964) que através da formulação inicial do VRP, propuseram um algoritmo que serviu de base a muitos estudos que se seguiram.

O VRP engloba diversas variantes, podendo estas estar relacionadas com a capacidade dos veículos, o tempo associado à realização da rota, a possibilidade de as

entregas englobarem mais que um cliente, entre outras, que serão abordadas ao longo deste documento.

2.3. *Pollution-Routing Problem (PRP)*

O facto de as estratégias de logística, tanto de produção como de distribuição, não serem sustentáveis a longo prazo, fez com que houvesse uma crescente preocupação no modo como são elaboradas as políticas das organizações. Como tal, surge a necessidade de tornar as atividades das organizações mais sustentáveis.

De acordo com a EEA (2019), um terço da energia final consumida na União Europeia deve-se aos transportes. Para além disso, grande parte desta energia provém de fontes de energia fóssil não renováveis, como o petróleo. Como é do conhecimento geral, as emissões de gases de efeito de estufa contribuem negativamente para as alterações climáticas e os transportes são os principais responsáveis.

Surge, então, a variante *Pollution-Routing Problem* que foi introduzida por Bektaş e Laporte (2011) e pretende preencher a lacuna que autores consideravam que existia no VRP, uma vez que os estudos anteriores não incorporavam fatores ambientais, mais especificamente as emissões de gases de efeito de estufa (GEE).

O PRP tem em consideração a poluição, sendo que o seu principal objetivo é a minimização dos custos totais que englobam os custos relacionados com o condutor, o consumo de combustível e o custo associado às emissões de gases efeito de estufa para a atmosfera.

2.4. Variantes do *Vehicle Routing Problem*

Com o decorrer dos anos, diversas variantes do VRP têm vindo a surgir. Estas, podem estar relacionadas com inúmeros aspetos, tal como o tipo de frota, as especificações quanto a janelas temporais das entregas, a capacidade dos veículos, entre outros.

2.4.1. *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*

Uma das variantes mais abordadas em diversos trabalhos está relacionada com a capacidade dos veículos e é conhecida como CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem*). Foi introduzida por Dantzig e Ramser (1959) e traduz-se na consideração de que

um conjunto de clientes, com pedidos já conhecidos, devem ser atendidos por uma frota de veículos homogêneos que possuem capacidades limitadas.

O CVRP tem como principal objetivo a minimização da quantidade de rotas e a sua duração, tendo sempre em conta que todos os clientes devem receber os seus pedidos. Para além disso, visa minimizar os quilómetros que serão percorridos assim como a quantidade de veículos que serão atribuídos a estas rotas, uma vez que permitirá a redução das emissões de GEE.

2.4.2. Green Vehicle Routing Problem (GVRP)

O conceito de *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP), proposto inicialmente por Erdoğan e Miller-Hooks (2012), caracteriza-se como sendo uma extensão do problema clássico de rotas mencionado anteriormente. Esta variante tem em consideração fatores externos tal como emissões de dióxido de carbono, com o intuito de as reduzir. Como tal, recorrem a modelos que permitirão o cálculo das emissões provenientes do consumo de combustível, modelos estes que serão abordados no decorrer do documento.

Esta variante pretende minimizar a distância total percorrida ao efetuar as entregas a um conjunto de clientes, recorrendo ao uso de veículos pertencentes a uma frota homogénea.

A principal diferença entre este modelo e o PRP, reside na formulação do problema. Se por um lado ambos têm em consideração os fatores ambientais, por outro lado as funções objetivo são bastante diferentes. Enquanto o GVRP pretende minimizar a distância total a percorrer, o PRP tem como objetivo a minimização dos custos totais, incluindo custos relacionados com o transporte da carga, os custos associados ao consumo de combustível e emissões de GEE e por fim, os custos associados ao condutor.

2.4.3. Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)

O VRP possui uma variante relativamente às janelas temporais denominada VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Windows*). Estas podem ser impostas pelos próprios clientes, assim como pelas características do produto que assim o exigem.

O VRPTW pode ser descrito como o problema de projeção rotas, ao menor custo possível, para um conjunto de pontos geograficamente dispersos. Estas rotas devem ser projetadas de forma a que cada cliente seja visitado apenas uma vez, por apenas um

veículo, num determinado intervalo de tempo. Para além disso, todas as rotas iniciam e terminam o seu percurso no armazém e as quantidades totais a serem entregues não podem exceder a capacidade do veículo (Bräysy & Gendreau, 2005).

Assim sendo, a cada cliente i está associada uma janela temporal $[a_i, b_i]$ com um tempo de serviço s_i (Rizzoli, Montemanni, Lucibello, & Gambardella, 2007).

2.4.4. Multi-Trip Vehicle Routing Problem (MTVRP)

A variante *Multi-Trip Vehicle Routing Problem (MTVRP)* considera que um determinado veículo pode executar diversas *trips*, ou seja, diferentes sequências para visitar os clientes. Isto é, nesta variante, o veículo pode efetuar uma entrega a um cliente e retornar ao depósito central para preparar a entrega do cliente seguinte, retomando de seguida o percurso, mas nunca descorrendo as restrições a que se encontra sujeito. A Figura 2.2 evidencia um exemplo desta variante.

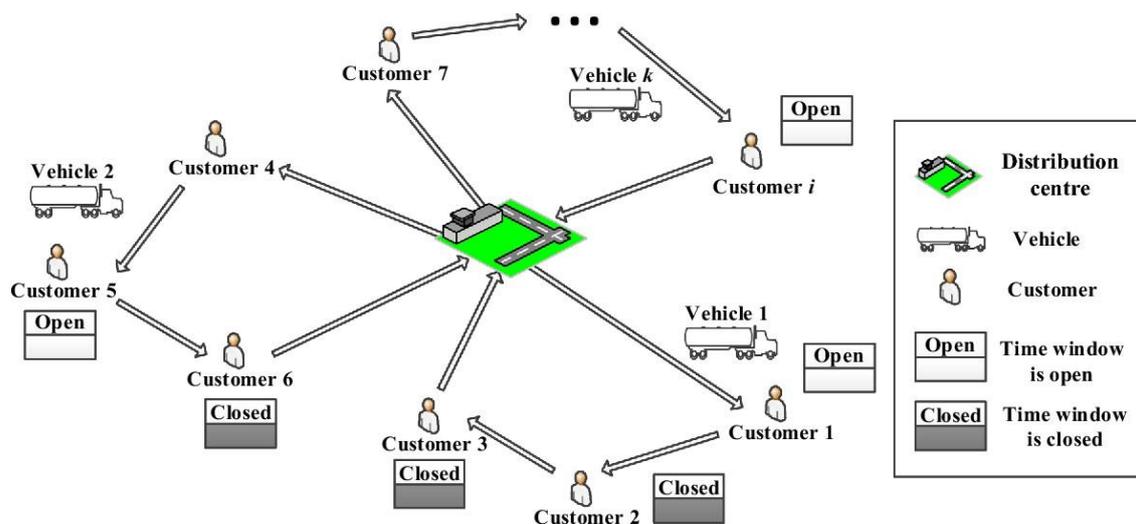


Figura 2.2. Exemplo das variantes VRPTW e MTVRP (Fonte: Sun, Wang, Lang, & Zhou (2019))

2.4.5. Multi-Compartment Vehicle Routing Problem (MCVRP)

Uma variante do VRP muito utilizada nos problemas de distribuição de combustível é conhecida como *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem (MCVRP)*. Nesta variante, os veículos possuem vários compartimentos, que podem ser usados para utilizar diferentes produtos, sendo que a capacidade destes pode variar de compartimento para compartimento.

Visto ser uma variante muito utilizada para a entrega de combustível nos postos de abastecimento, implica algumas restrições, tais como:

- **Janelas temporais**, visto que estes postos preferem que as entregas sejam realizadas nos períodos com menores vendas;

- O facto destes compartimentos não possuírem medidores de caudal faz com que todo o produto existente no compartimento não possa ser usado para abastecer mais do que um cliente.

- **Quantidades a entregar**, uma vez que estas não podem ser superiores à capacidade do compartimento. Para além disso, muitas das vezes os diferentes compartimentos de um veículo transportam diferentes produtos, o que significa que um compartimento deve transportar sempre o mesmo tipo de produto, de modo a que não exista contaminação.

2.5. Modelos de consumo de combustível

A quantificação das emissões provenientes das atividades de transporte não é direta Dukkanci, Bektaş e Kara (2019), uma vez que uma rota mais curta não implica, necessariamente, uma quantidade menor de combustível consumido pois existem outros fatores que influenciam o consumo, tal como evidencia a Figura 2.3.

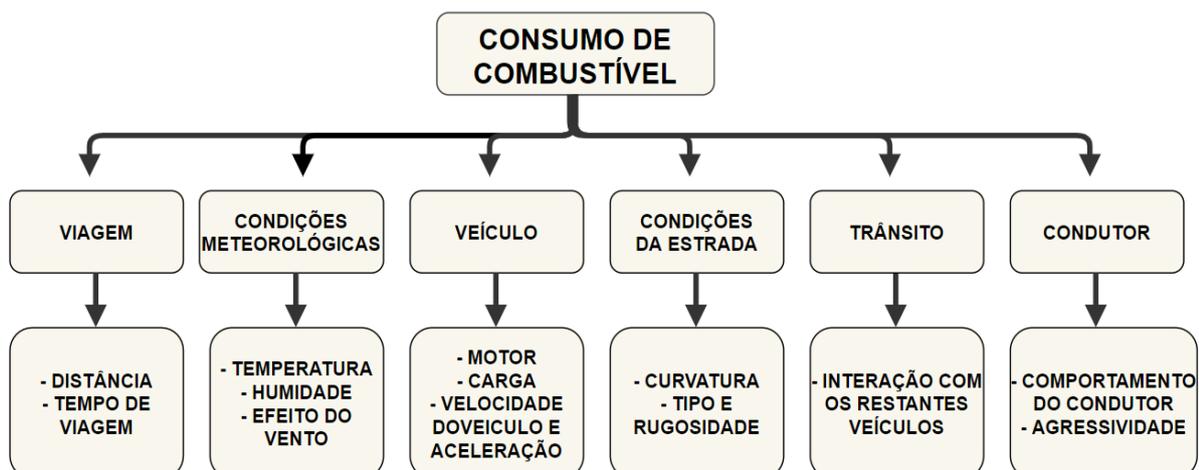


Figura 2.3. Fatores que influenciam o consumo de combustível (baseado em Zhou, Jin, & Wang (2016))

Segundo Demir, Bektaş e Laporte (2014), a diferença nas emissões de um veículo, entre os melhores e os piores condutores, pode chegar aos 25% numa distância de 100 km.

O consumo de combustível pode ser categorizado em dois modelos distintos dependendo do grau de complexidade, sendo eles: modelos macroscópicos e modelos microscópicos (Bektaş, Demir e Laporte, 2015).

2.5.1. Modelos Macroscópicos

Os modelos macroscópicos são menos complexos que os modelos microscópicos e recorrem a parâmetros médios para estimar as emissões que resultam do consumo do combustível, sendo estes parâmetros frequentemente expressos por unidade de distância.

O primeiro modelo macroscópico é o *Methodology for Calculating Transportation Emissions and Energy Consumption* (MEET), foi introduzido por Hickman et al. (1999) e pretende abranger diferentes classes de veículos.

Para veículos com um peso inferior a 3.5 toneladas, a taxa de emissões por quilometro é calculada a partir de (2.1) onde v é a velocidade média com que circula o veículo.

$$e(v) = 0.0617v^2 - 7.8227v + 429.51. \quad (2.1)$$

Para as restantes classes de veículos, a taxa de emissões por quilometro é calculada através da equação (2.2), onde os restantes parâmetros se encontram na Tabela 2.1.

$$e(v) = K + a \cdot v + b \cdot v^2 + c \cdot v^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad (2.2)$$

Para ambos os casos a taxa $e(v)$ é a taxa de emissões de CO₂ (g/km) para um veículo de mercadorias sem carga numa estrada com gradiente zero.

Tabela 2.1. Parâmetros das emissões usados no modelo MEET (Fonte: Adaptado de Bektaş et al.(2015))

Peso [ton]	K	a	B	c	d	e	f
3.5<Peso<7.5	110	0	0	0.000375	8,702	0	0
7.5<Peso<16	871	-16.0	0.143	0	0	32,031	0
16<Peso<32	765	-7.04	0	0.000632	8,334	0	0
Peso>32	1,576	-17.6	0	0.00117	0	36,067	0

O segundo modelo é o *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transportation* (COPERT) e estima as emissões de acordo com a classificação do motor e do tipo de veículo, através da consulta a uma base de dados. O cálculo do consumo total de combustível para um veículo com um peso de 20-26 toneladas, movido a Diesel, é realizado através da equação (2.3), sendo que os coeficientes se encontram evidenciados na Tabela 2.2.

$$F(v, D) = (e + (a \exp(-b \cdot v)) + (c \exp(-d \cdot v))) \cdot D \quad (2.3)$$

Tabela 2.2. Conjunto de dados amostra para o modelo COPERT (Fonte: Adaptado de Bektaş et al.(2015))

Carga Útil (%)	Gradiente (%)	a	B	c	d	e
0	0	530.707	0.0634	2,704.528	0.512	157.588
0	-2	546.477	0.064	9,599.652	0.766	61.960
0	+2	1,051.552	0.424	-67.668	0.084	0
50	0	505.770	0.051	4,762.796	0.609	180.436
50	-2	479.620	0.047	7,858.071	0.677	40.246
50	+2	2,074.874	1.008	-0.534	0	0
100	0	502.941	0.041	9,343.090	0.729	195.202
100	-2	1,144.824	0.981	-0.400	0	0
100	+2	1,882.813	1.006	-0.422	0	0

2.5.2. Modelos Microscópicos

Os modelos microscópicos são de maior complexidade, uma vez que lidam apenas com emissões "quentes", isto é, emissões de escape de um motor em funcionamento (Eglese & Bektas, 2014). Assim sendo, exigem que os dados sejam muito precisos e detalhados, o que torna estes modelos mais dispendiosos comparativamente aos modelos macroscópicos.

Têm como principal objetivo estimar as taxas de emissões para um determinado veículo, num dado período durante o seu ciclo de condução.

Um exemplo destes modelos é conhecido como *Instantaneous Fuel Consumption Model* e recorre a características como a massa, energia, parâmetros de eficiência, força de arrasto e componentes de consumo de combustível (Bektaş et al., 2015) para o cálculo do consumo de combustível. Este, pode ser calculado através da expressão (2.4), sendo que $f(t)$ diz respeito ao consumo de combustível por unidade de tempo (mL/s), α é a taxa constante de consumo de combustível de um motor em funcionamento quando o veículo não se encontra em marcha, $R(t)$ é a força de tração (kN) e é calculada através da equação (2.5), β_1 corresponde ao consumo de combustível por unidade de energia (mL/kJ), β_2 é o consumo de combustível por unidade de energia-aceleração mL/(kJ m/s²), a é a aceleração instantânea (m/s²), M é o peso total do veículo (kg) e por fim, v é a velocidade expressa em (m/s).

$$f(t) = \begin{cases} \alpha + \beta_1 \cdot R(t)v + (\beta_2 \cdot M \cdot a^2 \cdot v/1000), & R_t > 0 \\ \alpha, & R_t \leq 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$R(t) = b_1 + b_2 \cdot v^2 + \frac{M \cdot a}{1000} + \frac{g \cdot M \cdot \omega}{100000} \quad (2.5)$$

Como já foi mencionado anteriormente, é necessário calcular o valor de $R(t)$, onde b_1 corresponde à resistência ao rolamento (kN), b_2 é a força aerodinâmica do rolamento e por fim, g refere-se à aceleração gravítica.

Outro exemplo de um modelo microscópico é o *Comprehensive Modal Emissions Modeling (CMEM)* e foi desenvolvido com o objetivo de estimar o consumo de combustível de veículos pesados, com uma restrição de peso de 11,794 kg, através da equação (2.6):

$$FR = \phi \left(kNV + \frac{P}{\eta} \right) / x \quad (2.6)$$

onde \emptyset representa relação de massa de combustível - ar, k é o fator de atrito do motor, N é a velocidade do motor, V é o deslocamento do motor, P é a potência do motor segundo a segundo, sendo que a unidade é kW, η corresponde à eficiência para motores a diesel e por fim, x representa uma constante. A velocidade do motor N pode ser calculada através da expressão (2.7). Para este cálculo, é necessário o conhecimento de vários parâmetros, S representa a razão entre a velocidade do motor e a velocidade do veículo na engrenagem superior L_g , $R(L)$ é a relação de transmissão e por fim, v é a velocidade do veículo em m/s.

$$N = S \left(\frac{R(L)}{R(L_g)} \right) \cdot v \quad (2.7)$$

Além do cálculo da velocidade do motor é necessário calcular o valor de P , potência do motor, através da expressão $P = \frac{P_t}{n_t} + P_a$, sendo que n_t corresponde à eficiência da transmissão e P_a diz respeito à de potência do motor necessária associada às perdas de funcionamento do mesmo e à operação de acessórios do veículo, como o uso de ar-condicionado (Eglese & Bektaş, 2014). Contudo, este cálculo só é possível depois da determinação do valor de P_t , que pode ser obtido através da expressão (2.8) onde ρ representa a densidade do ar em kg/m³, A diz respeito à área da superfície frontal, C_d é o coeficiente de resistência aerodinâmica e por fim, C_r é a resistência ao rolamento. Os restantes parâmetros já foram definidos anteriormente.

$$P_t = (Ma + Mg \sin \theta + 0.5C_d\rho Av^2 + Mg C_r \cos \theta) v / 1000 \quad (2.8)$$

A Figura 2.4 compara o modelo macroscópico MEET com o modelo microscópico CMEM, de forma a que seja mais perceptível o modo como estes modelos relacionam o consumo de combustível com a velocidade a que circula o veículo. Como é possível observar, para uma velocidade 50 km/h, por exemplo, de acordo com o modelo CMEM existe um consumo de cerca de 1.60 litros enquanto que o através de MEET, esse valor é de cerca de 1 litro. Contudo, para uma velocidade de 100 km/h, o consumo já é praticamente o mesmo para ambos os modelos.

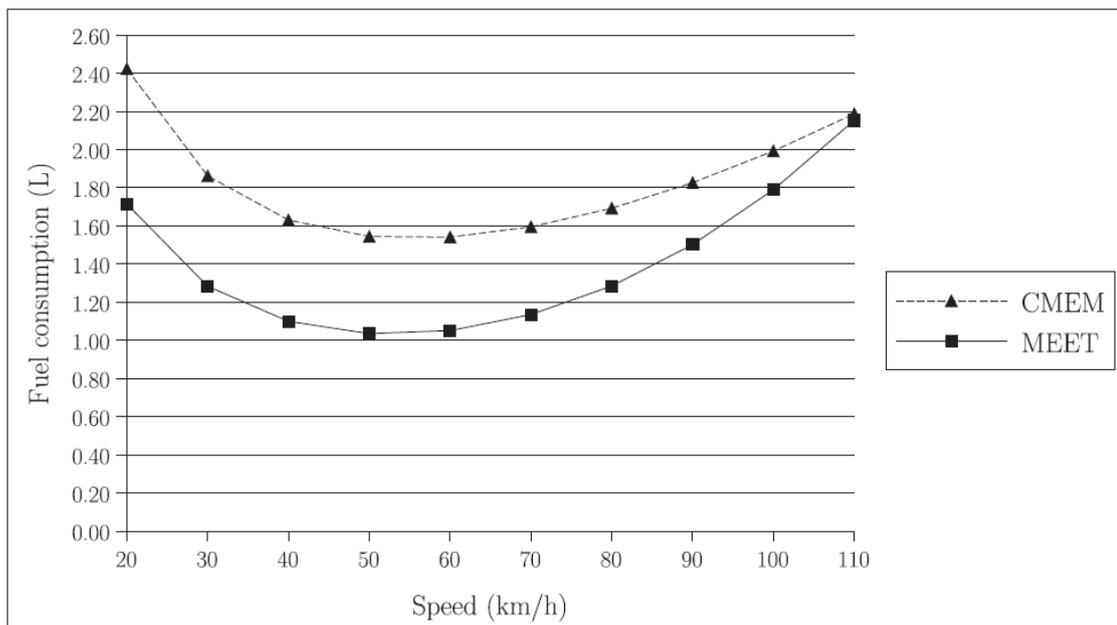


Figura 2.4. Comparação da relação entre a velocidade e o consumo de combustível no modelo MEET e CMEM (Fonte: Eglese e Bektaş (2014))

2.6. Métodos de Solução

Nos últimos anos, vários autores realizaram diferentes estudos com o intuito de avaliar o *Pollution-Routing Problem*. Como é possível observar pela Tabela 2.3, estes recorreram a diferentes métodos, sendo que os mais usados foram a abordagem exata e a heurística.

Tabela 2.3. Métodos utilizados por diferentes autores (baseado em Dukkanci, Kara e Bektaş (2019))

Autores	Método utilizado
Bektaş and Laporte (2011)	Abordagem Exata
Demir et al. (2012)	Abordagem Exata e Heurística
Kramer et al. (2015)	Heurística
Soysal et al. (2016)	Abordagem Exata
Saka et al. (2017)	Heurística
Majidi et al. (2017)	Heurística

2.6.1. Abordagem exata

Os algoritmos de programação matemática são utilizados com o intuito de encontrar uma solução exata, nas situações em que estas, de facto, existam. De um modo geral, são baseados em modelos de programação linear inteira mista que podem ser resolvidos através do algoritmo *Branch and Bound*.

Este tipo de abordagem possui a desvantagem de ser morosa e exigir bastante memória, o que faz com que seja uma abordagem adequada para problemas de menor dimensão, caso contrário o tempo de processamento será muito elevado.

2.6.1.1. Branch and Bound

O algoritmo *Branch and Bound* baseia-se numa pesquisa em árvore através da partição e avaliação sucessiva das soluções que serão obtidas. Os problemas estão sempre associados a uma certa complexidade e pelo que, o problema será subdividido em problemas cada vez menos complexos (Hiller e Lieberman, 2005). Os sub-conjuntos originados serão avaliados sistematicamente até que se encontre a melhor solução, sendo que esta avaliação será através do estabelecimento de um limite inferior e um limite superior para cada solução. À medida que se valida uma solução, um novo ramo da árvore surge até que seja encontrada a solução exata.

2.6.2. Heurísticas

De acordo com Gaspar Cunha, Takahashi e Henggeler Antunes (2012), heurísticas são procedimentos que pretendem resolver problemas de otimização, sem dispor de garantias que a solução ótima exata será obtida nem tampouco que a solução obtida tenha proximidade com a solução ótima exata. Pode-se falar de heurística no contexto de variáveis discretas e de variáveis contínuas. Contudo, deve-se notar que para se obter resultados mais perto da realidade, a partir destas heurísticas, pode-se recorrer a procedimentos híbridos que irão combinar diferentes métodos.

Comparativamente ao método de algoritmos exatos, têm a vantagem de encontrar soluções quase ideais num curto espaço de tempo, mesmo quando o problema é de grande complexidade. Para além disso, dado que estamos perante um problema *NP-hard*, as heurísticas são mais adequadas, uma vez que é um problema onde existem muitos dados e se pretende que os resultados sejam os mais parecidos com a realidade.

Nos diversos estudos de PRP, os autores recorreram a diferentes abordagens, sendo que grande parte destas foi através do desenvolvimento de uma heurística. Estas, agrupam-se em dois grupos: as heurísticas clássicas e as meta-heurísticas.

2.6.2.1. Heurísticas Clássicas

As heurísticas clássicas permitem a obtenção de soluções de boa qualidade num pequeno período de tempo, através da exploração limitada do espaço de pesquisa. Para além disso, podem ser usadas num amplo espectro de restrições, o que torna o seu uso muito comum. Podem ser divididas em heurísticas construtivas, heurísticas de duas fases e por último, heurísticas de melhoria.

2.6.2.1.1. Heurísticas construtivas

De acordo com Gilbert Laporte e Semet (2002), existem duas técnicas que são utilizadas nas heurísticas construtivas associadas ao problema de VRP:

1. A fusão de rotas existentes usando um critério de poupanças;
2. A atribuição gradual de vértices às rotas dos veículos através de um custo de inserção.

Um dos métodos heurísticos mais utilizados nos problemas de rotas é o **Algoritmo das Poupanças de Clarke e Wright (1964)** e aplica-se a todo o tipo de problemas devido à sua enorme flexibilidade. Este método baseia-se nas poupanças que ocorrem através da distância percorrida em dois cenários diferentes. No primeiro cenário, um veículo sai do depósito e visita o cliente *i* e retorna ao depósito, visitando depois o cliente *j*. Ou seja, são realizadas duas viagens. No segundo cenário, o veículo inclui os dois clientes na mesma rota, como evidencia a Figura 2.5.

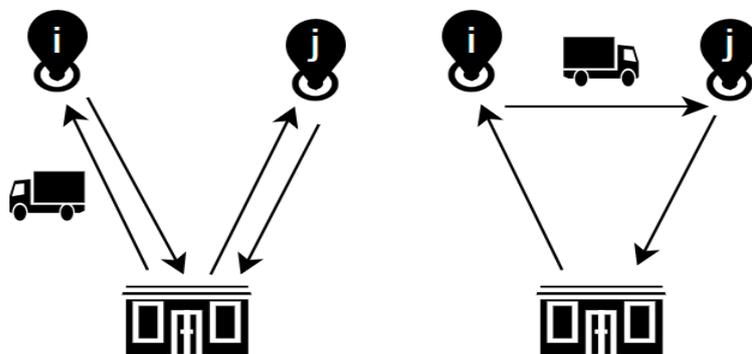


Figura 2.5. Cenários existentes para o cálculo das poupanças do Algoritmo de Clarke e Wright (1964)

Esta inclusão, permitirá uma poupança de custos, uma vez que a distância que o veículo percorre é menor. Assim sendo, através da expressão $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$ para $i, j = 1, \dots, n$ e $i \neq j$ é obtida a poupança entre o cliente i e o cliente j , sendo que C_{i0} representa o custo da deslocação depósito-cliente i , C_{0j} o custo da deslocação depósito-cliente j e por fim, C_{ij} representa o custo da deslocação entre os dois clientes. Caso o valor de S_{ij} seja positivo, então a rota gerará lucro.

De acordo com G. Laporte, Gendreau, Potvin e Semet (2000) etapas deste algoritmo são as seguintes:

- **Etapa 1:** Cálculo das poupanças, através da expressão mencionada anteriormente;
- **Etapa 2:** Criação de n rotas $(0, i, 0)$ para $i = 1, \dots, n$.
- **Etapa 3:** Ordenar as poupanças da mais lucrativa para a menos lucrativa.
- **Etapa 4 (Versão paralela):** Através da ordem obtida na etapa anterior, é verificado se as rotas existentes $(0, \dots, i, 0)$ e $(0, \dots, j, 0)$ podem ser englobadas numa única. Caso seja possível, surge uma nova rota $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$. Este processo continuará desde que a condição $S_{ij} \geq 0$ seja cumprida.
- **Etapa 4 (Versão sequencial):** Através da rota $(0, i, \dots, j, 0)$ é determinada a poupança S_{ki} ou S_{jl} que pode ser utilizada para a fusão da rota atual com outra rota que termine em $(k, 0)$ ou então que inicie com $(0, 1)$. Posto isto, é implementada a fusão e o processo é repetido para as restantes poupanças. Caso não existam mais fusões exequíveis, é considerada a rota seguinte e são aplicadas as mesmas operações.

2.6.2.1.2. Heurísticas de melhoria

As heurísticas de melhoria são frequentemente usadas com o intuito de melhorar soluções geradas por outros tipos de heurísticas. Através de pequenas alterações é possível a obtenção de novas soluções que podem, ou não, produzir melhorias na função objetivo. Estas pequenas alterações podem ser de vários tipos, como por exemplo:

- A alteração da ordem de visita dos clientes;
- A alocação de um cliente a uma rota distinta da que lhe foi atribuída;
- A troca de posições entre clientes.

No caso de existirem melhorias na função objetivo, as movimentações são implementadas.

Um exemplo deste tipo de heurística é a **Pesquisa Local**. É dos métodos mais utilizados e consiste na pesquisa de possíveis soluções viáveis na vizinhança de uma solução anteriormente obtida. O algoritmo genérico deste método pode ser descrito como:

1. Obtenção de uma solução inicial s_i
2. Definição de uma vizinhança $s_j \in V(s_i)$
3. Se $f(s_j) < f(s_i)$ então $s_i = s_j$
4. Caso contrário, $V(s_i) = V(s_i) - s_j$
5. Se $V(s_i) \neq \emptyset$ voltar ao passo 2
6. Caso contrário, solução ideal local = s_i

2.6.2.2. Meta-heurísticas

As meta-heurísticas traduzem-se em métodos que podem ser aplicados numa grande variedade de problemas através da exploração do espaço de solução mais promissor para o problema em questão. Geralmente combinam regras sofisticadas de pesquisa de vizinhança, estruturas de memória e recombinações de soluções (Laporte et al, 2000).

Comparativamente às heurísticas clássicas, possuem a vantagem de apresentarem soluções com maior qualidade num curto período de tempo. Contudo, acarretam custos superiores.

2.6.2.2.1. Large Neighbourhood Search

Este tipo de meta-heurísticas foi originalmente proposto por Shaw (1997) e segundo o mesmo trata-se de um procedimento de otimização que recorre à pesquisa local dentro de uma vizinhança onde as alterações são aceites caso melhorem a função objetivo e rejeitadas caso contrário.

De acordo com Roli, Benedettini, Stützle e Blum (2012) este método pretende articular as vantagens inerentes a uma grande vizinhança, nomeadamente o aumento das capacidades exploratórias, com a exploração em árvore que torna o processo mais ágil que a enumeração.

2.6.2.2.2. Tabu search

Consiste num método de pesquisa local meta-heurístico usado para otimização matemática através da alteração da estrutura da vizinhança durante todo o processo. A pesquisa por tabu (TS) inicia-se com uma solução inicial x_1 e move-se a cada iteração t de x_t para o melhor vizinho x_{t+1} , até que um critério de paragem seja satisfeito (Laporte et al, 2000).

O TS aprimora o desempenho dessas técnicas ao proibir soluções já visitadas ou outras por meio de regras fornecidas pelo utilizador.

Um procedimento básico de TS possui 3 etapas:

1. **Inicialização:** Inicia-se o processo com a solução de teste inicial.
2. **Iteração:** Traduz-se no uso de um procedimento de busca apropriado para definir mudanças concretizáveis na vizinhança. Eliminação dos movimentos existentes na lista, a não ser que estes resultem numa melhor solução. De seguida, determinam-se quais as alterações que poderão resultar em melhores soluções e caso estas existam, recorre-se à sua adoção. Por fim, atualiza-se a lista de modo a impedir que o ciclo volte à situação inicial.
3. **Critério de paragem:** Este critério pode ser um número limite de iterações, uma quantidade fixa de tempo de *Central Process Unit* (CPU), entre outros.

3. PROBLEMA DE PLANEAMENTO DE ROTAS

Tal como mencionado anteriormente, o principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão que permitirá às empresas um planeamento das rotas mais consciente, uma vez que tem em conta as implicações ambientais associadas a esta atividade.

Dos vários modelos existentes na literatura, a escolha recaiu no *Pollution-Routing Problem*, uma vez que esta variante tem em consideração fatores ambientais tal como a poluição e não pretende apenas minimizar a distância a percorrer entre o depósito central e os diferentes clientes.

3.1. Formulação do Problema

O conceito de *Pollution-Routing Problem* foi introduzido por Bektaş e Laporte (2011) e consiste no planeamento de rotas desde um depósito central até vários pontos dispersos, através de um conjunto de veículos homogéneo. Tem como principal objetivo a minimização dos custos totais que englobam os custos relacionados com o condutor, o consumo de combustível e o custo associado às emissões de gases efeito de estufa para a atmosfera.

Este problema é representado por um garfo $G = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$, onde $\mathcal{N} = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ e representa um conjunto de vértices e \mathcal{A} corresponde ao conjunto de arcos definidos entre cada par de vértices, sendo que o depósito central é representado por 0 e $\mathcal{N}_0 = \mathcal{N} \setminus \{0\}$ é o conjunto de clientes. Cada cliente $i \in \mathcal{N}_0$ tem uma procura q_i associada que será respondida dentro de um intervalo de tempo $[a_i, b_i]$ pré-definido. O momento em que o serviço inicia no nó j é representado pela variável y_j e o mesmo acontece no nó i através de y_i . O tempo de serviço necessário para que o veículo sirva o cliente i é denotado por t_i e a distância entre i e j por d_{ij} . A variável binária x_{ij} é igual a 1 caso o veículo viaje no arco $(i, j) \in \mathcal{A}$, sendo que para este arco a variável f_{ij} representa a quantidade de fluxo de mercadorias. As deslocações serão realizadas por um conjunto homogéneo de veículos $\mathcal{K} = \{0, 1, 2, \dots, m\}$ com capacidade Q .

O problema é formulado do seguinte modo:

Min

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} \quad (3.1)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} \quad (3.2)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) d_{ij} \beta \left(\sum (\bar{v}^r)^2 z^r_{ij} \right) \quad (3.3)$$

$$+ \sum_{j \in \mathcal{N}_0} p s_j \quad (3.4)$$

s.a

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{0j} = m \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{N}_0 \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{N}_0 \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} f_{ji} - \sum_{j \in \mathcal{N}} f_{ij} = q_i \quad \forall i \in \mathcal{N}_0 \quad (3.8)$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij} \quad \forall (i,j) \in \mathcal{N}_0 \quad (3.9)$$

$$y_i - y_j + t_i + \sum_{j \in \mathcal{N}} (d_{ij} / \bar{v}^r) z^r_{ij} \leq M_{ij} (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N}_0, i \neq j \quad (3.10)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in \mathcal{N}_0 \quad (3.11)$$

$$y_j + t_j - s_j + \sum_{j \in \mathcal{N}} (d_{j0} / \bar{v}^r) z^r_{j0} \leq L (1 - x_{j0}) \quad \forall j \in \mathcal{N}_0 \quad (3.12)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} z^r_{ij} = x_{ij} \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad (3.13)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad (3.14)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad (3.15)$$

$$z^r_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A}, r \in \mathcal{R} \quad (3.16)$$

A função objetivo que se pretende minimizar está dividida em quatro componentes. Os componentes representados por (3.1) e (3.2) quantificam os custos

incorridos do transporte da carga, incluído o peso do veículo. O componente (3.3) calcula os custos que ocorrem através das variações da velocidade. Assim sendo, os três componentes mencionados anteriormente estão diretamente relacionados com o custo total de consumo de combustível e custo das emissões de GEE. Isto deve-se ao facto de as três equações terem em comum o custo unitário $(c_f + e)$ que multiplicado pelas diferentes variáveis permite a quantificação do combustível consumido no arco (i, j) . O último componente está representado por (3.4) e corresponde ao valor total a pagar aos condutores.

A restrição (3.5) indica que m veículos partem do depósito central. A restrição (3.6) e (3.7) visa garantir que cada cliente é visitado exatamente uma vez. A restrição (3.8) assegura que o balanço do fluxo está de acordo com a quantidade exigida por parte de cada cliente que será visitado. De acordo com (3.9), a carga a transportar não poderá exceder a capacidade do veículo. As janelas temporais pré-definidas são impostas através de (3.10) e (3.11). O tempo total de condução para cada veículo é calculado através da equação (3.12). Por fim, a restrição (3.14) garante que o fluxo de mercadorias não é negativo.

3.2. Adaptações do problema e do sistema de apoio à decisão

O modelo *Pollution-Routing Problem* considera que as janelas temporais são pré-definidas e que a frota de veículos é homogénea. A partir deste modelo, realizaram-se algumas alterações. Uma dessas alterações consistiu na mudança das especificações das janelas temporais sendo que com esta alteração é possível definir as janelas temporais tendo em conta as necessidades e preferências dos clientes. Outra alteração foi a possibilidade deste modelo se aplicar a empresas com frotas de veículos heterogéneas. Para além disso, sempre que alguma restrição não é satisfeita, é considerada uma penalidade na função objetivo, sendo este tema explorado de seguida. Estas modificações contribuirão positivamente uma que vez que torna este sistema de apoio à decisão mais completo e permite o uso em diferentes indústrias.

O desenvolvimento do sistema de apoio à decisão teve como base um outro sistema existente na literatura relativo ao *Vehicle Routing Problem* criado por Erdoğan (2017).

Para o funcionamento da aplicação são necessários dados de entrada dos clientes, dos veículos pertencentes à frota e dos depósitos centrais, de forma a que o planeamento das rotas possa ser realizado.

De modo que fosse possível a obtenção de resultados, recorreu-se ao uso de dados de clientes relativos a um problema real de uma organização de distribuição retalhista, nomeadamente as localizações dos clientes e dos depósitos centrais. Contudo, por questões de confidencialidade as distâncias calculadas foram sobredimensionadas. Relativamente aos dados técnicos das viaturas, estes foram adotados do trabalho de Franceschetti, Honhon, Van Woensel, Bektaş e Laporte (2013).

Após a introdução destes dados, é introduzida informação do depósito de onde as mercadorias serão expedidas, seguido da inserção da encomenda e por fim, a seleção dos veículos disponíveis. Após a inserção da informação necessária, será gerado o planeamento de rotas obtido assim como a atribuição de um veículo a cada rota, tal como evidencia a Figura 3.1. Todo este processo será explicado com mais detalhe ao longo do texto.

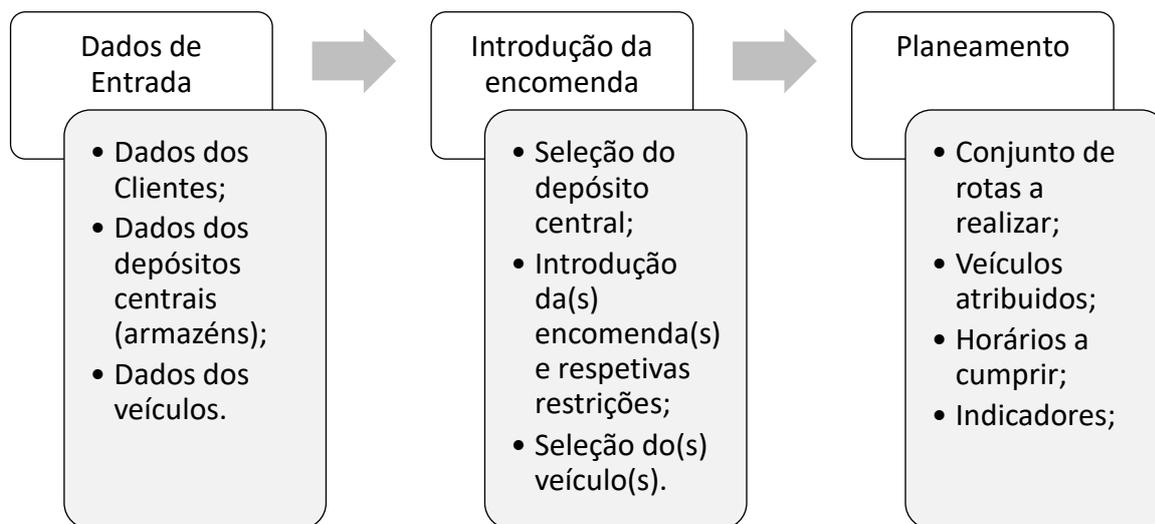


Figura 3.1. Resumo do processo de planeamento.

No modelo desenvolvido por Erdoğan (2017), no caso de alguma especificação não ser cumprida, é aplicada uma penalidade à função objetivo, tendo este procedimento sido incorporado no sistema de apoio à decisão desenvolvido. As penalidades podem estar relacionadas com inúmeros fatores, nomeadamente incumprimentos de janelas temporais, capacidade dos veículos, limite de horas de viagem, entre outros fatores. No caso de uma ou mais restrições serem violadas na solução que apresenta melhor resultados, o modelo

retornará uma mensagem a informar o sucedido. Cabe ao utilizador decidir se pretender visualizar as rotas da solução obtida.

O motivo pela qual no sistema desenvolvido Erdoğan (2017) estas rotas não são descartadas automaticamente prende-se no facto de que mesmo com a penalidade aplicada, a solução obtida apresenta melhores resultados que as restantes soluções.

Em termos matemáticos, uma solução é considerada exequível ou inexecuível. Contudo, em termos práticos, uma solução considerada inválida poderá tornar-se válida através da negociação entre as partes envolvidas. A Tabela 3.1 evidencia alguns tipos de incumprimento que podem surgir na solução final obtida, assim como possíveis formas de resolução.

Tabela 3.1. Incumprimentos que poderão surgir e as suas possíveis soluções.

Exemplos de incumprimentos	Possíveis soluções
Excesso do tempo limite de trabalho em poucos minutos (15 minutos).	Negociação com o condutor acerca do pagamento das horas extras.
Violação das janelas temporais.	Negociação com os clientes acerca da flexibilidade das janelas temporais.
Atribuição de veículos que não se encontram disponíveis.	Averiguar se é economicamente viável esperar que o veículo atribuído esteja disponível ou se é preferível atribuir um veículo que possa estar associado a custos mais elevados, mas que se encontra disponível no momento.

Tal como já foi mencionado, o principal objetivo deste sistema de apoio à decisão foca-se no planeamento de diferentes rotas através da minimização de todos os custos associados a esta atividade, nomeadamente os custos com o condutor, custos associados ao consumo de combustível e emissões de GEE, os custos associados ao transporte da carga e por fim, os custos associados às penalidades.

O cálculo dos custos totais é possível através das equações (3.17) - (3.20) e engloba diversos componentes.

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} \quad (3.17)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} \quad (3.18)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) d_{ij} \beta \left(\sum (\bar{v}^r)^2 z^r_{ij} \right) \quad (3.19)$$

$$+ \sum_{j \in N_0} p s_j \quad (3.20)$$

$$\alpha_{i,j} = a + g \cdot \sin(\theta)_{i,j} + g \cdot C_r \cdot \cos(\theta)_{i,j} \quad (3.21)$$

$$\beta = 0,5 \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \quad (3.22)$$

Os componentes (3.17) - (3.19) quantificam os custos derivados do transporte da carga e da variação da velocidade. Uma vez que a estes componentes está associado um custo unitário representado por $(c_f + e)$, é possível quantificar o consumo de combustível para o arco (i, j) . O último componente representado por (3.20) corresponde ao custo associado aos condutores. Para o cálculo de (3.17) - (3.19) é necessário o cálculo de $\alpha_{i,j}$ e β , constante do arco (i,j) e constante do veículo, respetivamente. Estes cálculos são possíveis através de (3.21) e (3.22).

A descrição de cada uma das variáveis necessárias para o cálculo dos diferentes componentes encontra-se evidenciado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Variáveis necessárias para o cálculo dos custos totais.

Variável	Descrição
c_f	Custo combustível
e	Custo das emissões
α_{ij}	Constante do arco (i, j) .
d_{ij}	Distância (i, j) .
w	Peso do veículo sem carga
f_{ij}	Carga a transportar
β	Constante do veículo
\bar{v}^r	Velocidade média
p	Custo por hora
s_j	Tempo total de trabalho
a	Aceleração
g	Aceleração gravítica
θ	Ângulo da estrada
C_r	Resistência ao rolamento
C_d	Coefficiente de resistência aerodinâmica
A	Área da superfície frontal
ρ	Densidade do ar

No sistema desenvolvido pelo autor, e através do *Bing Maps* é possível a visualização do planeamento de rotas obtido. Para tal é apenas necessária uma licença que foi obtida no website do motor de pesquisa *Bing*.

3.3. Métodos de Solução

Como já foi referido anteriormente, a resolução dos problemas de rotas recorre a diferentes métodos, a abordagem heurística e a solução exata. Contudo, visto se tratar de um problema *NP-hard*, a abordagem heurística torna-se mais adequada devido à complexidade do problema. Através deste método é possível a obtenção de soluções em períodos de tempo reduzidos. Caso se optasse por um método exato, os resultados obtidos não teriam a mesma qualidade uma vez que dada a complexidade do problema este tipo de abordagem não permite a obtenção de resultados num período de tempo útil.

Adicionalmente, é também utilizada a meta-heurística *Large Neighbourhood Search* desenvolvida por Erdoğan (2017), uma vez que se trata de um método bastante flexível para as diversas variantes dos problemas de rotas sendo que o Algoritmo 1 se encontra evidenciado a baixo.

Algoritmo 1 Implementação de um algoritmo *Large Neighbourhood Search* (LNS) desenvolvido por Erdoğan (2017)

- 1: **procedimento** LNS (depósitos centrais, clientes, distâncias, veículos da frota)
 - 2: Construção de uma solução inicial através da adição de clientes às rotas, selecionando os que melhoram a função objetivo
 - 3: **melhoria** da solução inicial através do método pesquisa local
 - 4: **registo** da solução inicial como a melhor solução
 - 5: **repeat**
 - 6: **destruição** da solução inicial através da remoção de vértices aleatórios
 - 7: **reparação** da solução inicial por métodos heurísticos através da adição de vértices
 - 8: **melhoria** da solução inicial através do método pesquisa local
 - 9: **if** a solução inicial apresentar melhores resultados que a solução definida como melhor solução **then**
 - 10: Registo da solução inicial como a melhor solução
 - 11: **else**
 - 12: Alteração da solução inicial pela melhor solução
 - 13: **until** o tempo decorrida seja maior que o tempo permitido pelo CPU
 - 14: **return** melhor solução
 - 15: **end** LNS
-

A abordagem de Erdoğan (2017) inclui ainda dois tipos de heurísticas clássicas: heurísticas construtivas e heurísticas de melhoria. As heurísticas construtivas permitem a construção gradual das soluções através da atribuição gradual de clientes às rotas dos veículos. Já as heurísticas de melhorias permitem a obtenção da melhoria das soluções geradas através de pequenas alterações tal como a remoção de vértices aleatórios e a pesquisa local.

Caso existam melhorias na função objetivo, então as movimentações efetuadas são implementadas.

3.4. Sistema de Apoio à Decisão

Neste subcapítulo encontra-se evidenciado o funcionamento do sistema de apoio à decisão.

Para além da função desenvolvida no presente documento foram incorporadas duas outras funções de modo a que o utilizador possa escolher a função que melhor se aplica às especificações da organização. Assim sendo, as três funções presentes no sistema de apoio à decisão são:

- A função desenvolvida ao longo do documento que tem como base o *Pollution-Routing Problem* e pretende minimizar os custos totais incorridos, nomeadamente os custos associados à carga, às emissões, ao consumo de combustível, ao condutor e por fim, as penalidades resultantes do incumprimento das especificações.
- Uma função relativa ao *Vehicle Routing Problem* desenvolvida por Erdoğan (2017) e que tem como principal objetivo a minimização da distância total a percorrer.
- Uma outra função de cariz ambiental, também baseada no *Pollution-Routing Problem* e que visa minimizar a energia despendida.

Com o intuito de automatizar o sistema de apoio à decisão, desenvolveram-se diversas macros que permitem a repetição de determinados comandos. De acordo com a *Microsoft Support*, uma macro caracteriza-se como sendo uma ação ou um conjunto de ações que permite a execução de uma tarefa as vezes necessárias. Para a sua criação, o utilizador

pode recorrer à ferramenta “Gravar Macro” no separador “Programador” sendo que todos os passos serão convertidos em código *Visual Basic for Applications* (VBA) ou então pode programar diretamente no editor.

Quando se inicia o sistema de apoio à decisão, irá aparecer o menu evidenciado na Figura 3.2, onde o utilizador poderá seleccionar a opção que pretende.

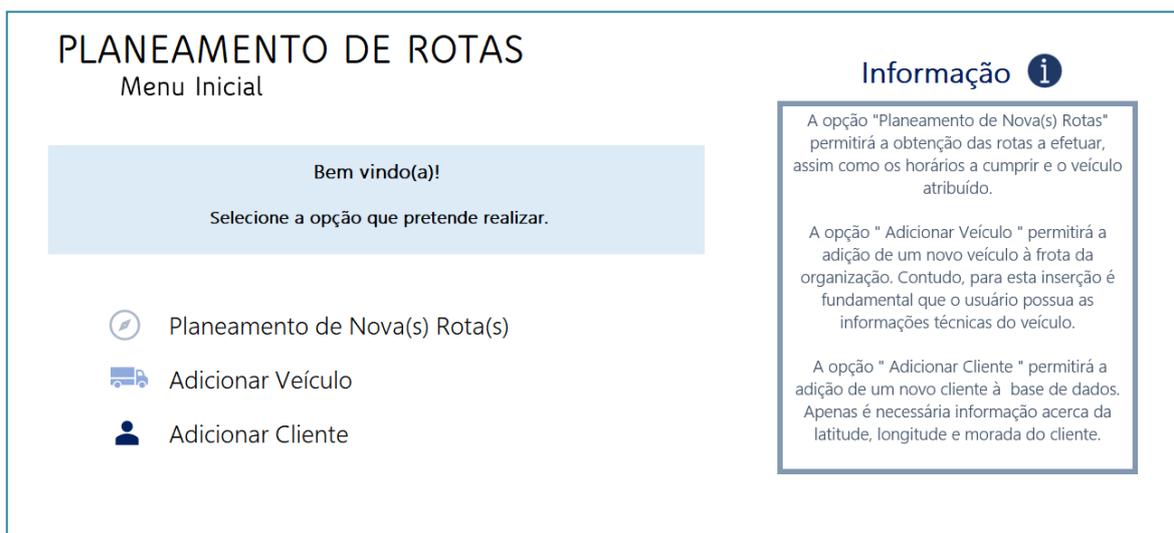


Figura 3.2. Menu Inicial.

Cada uma destas opções será explicada detalhadamente, começando com a opção “Planeamento de Nova Rota”.

Opção: Planeamento de Nova Rota

Quando o utilizador selecciona esta opção, aparecerá a página ilustrada na Figura 3.3, que como é possível observar se encontra por preencher. Caso o utilizador pretenda voltar ao menu inicial basta pressionar o botão “Voltar ao Menu” e se a folha se encontrar preenchida, basta carregar no botão “Limpar” e todo o conteúdo e formatação da tabela serão eliminados.

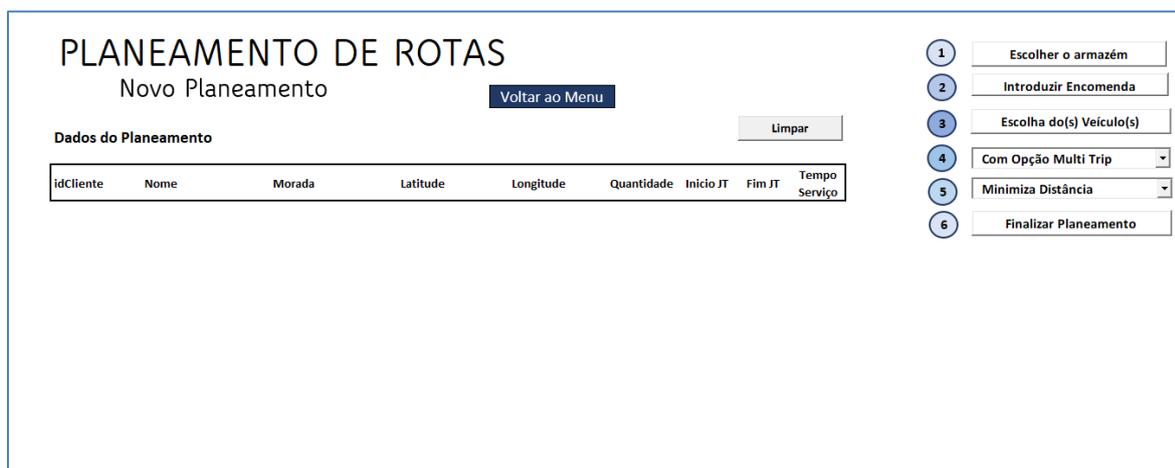


Figura 3.3. Página relativa à opção “Novo Planeamento”.

Escolha do armazém

Para iniciar o planeamento, o utilizador terá de pressionar o botão relativo à escolha do armazém. Caso o utilizador pressione algum dos botões seguintes sem que a escolha do armazém seja feita, aparecerá uma mensagem de aviso. Quando o botão “Escolher o armazém” é selecionado, aparecerá um formulário, onde será possível escolher a partir de qual dos armazéns os itens serão expedidos. Assim que o armazém é selecionado, as coordenadas desse local são preenchidas automaticamente. Para além disso, apesar do horário de funcionamento e o tempo de carregamento possuírem valores pré-definidos, estes poderão ser facilmente alterados, de acordo com as especificações dos clientes, tal como evidencia a Figura 3.4, onde é possível observar o formulário assim que se pressiona o botão e após o preenchimento dos dados.

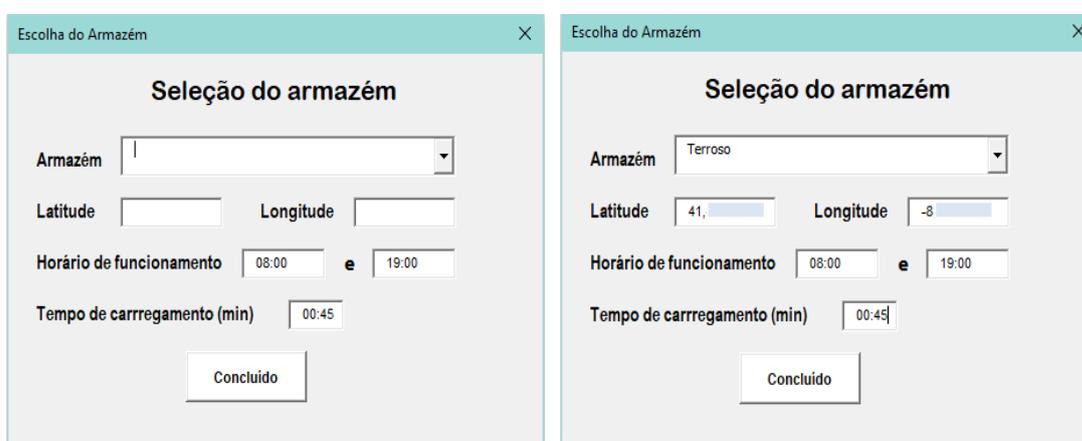


Figura 3.4. Formulário para a escolha do armazém.

Assim que o botão “Concluído” é pressionado, os dados serão preenchidos na página evidenciada anteriormente na Figura 3.3.

Introdução da encomenda

Feita a seleção do armazém, o passo seguinte é a introdução da encomenda que será feita através do botão “Introduzir encomenda”. O processo inicia-se com a introdução do Id do cliente, que assim que é introduzido preenche automaticamente os restantes dados, tal como nome, morada e coordenadas, tal como evidencia a Figura 3.5. Por questões de confidencialidade, o nome dos clientes será substituído por “xxx”. Segue-se a introdução da quantidade a transportar, assim como alteração do tempo previsto e as horas de entrega caso seja necessário. No caso de se pretender adicionar mais do que uma encomenda a partir do armazém selecionado anteriormente, o utilizador deve pressionar o botão “Próxima Encomenda”, mesmo que o cliente seja diferente. O botão “Concluído” só deve ser pressionado quando todas as encomendas estiverem adicionadas. Preenchido o formulário, toda a informação referente aos diferentes pedidos aparecerá na página referente à opção “Novo Planeamento”.

The figure displays two side-by-side screenshots of a web form titled "Introduzir Encomenda".

The left screenshot shows the form with the following fields: idCliente (empty), Nome (empty), Morada (empty), Latitude (empty), Longitude (empty), Quantidade (empty), Tempo previsto no cliente (empty), and Entregar entre (empty) e (empty). At the bottom, there are two buttons: "Próxima Encomenda" and "Concluído".

The right screenshot shows the form with the following fields filled: idCliente (15), Nome (xxx), Morada (BARQUEIROS), Latitude (41.4), Longitude (-8), Quantidade (1), Tempo previsto no cliente (00:20), and Entregar entre (08:00) e (19:00). At the bottom, there are two buttons: "Próxima Encomenda" and "Concluído".

Figura 3.5. Formulário para a introdução da encomenda.

Escolha do veículo

Introduzida a encomenda, segue-se a atribuição dos veículos ao planeamento de rotas. Como tal, o utilizador terá de pressionar o botão “Escolha do(s) veículo(s)” de modo a informar quais os veículos que se encontram disponíveis no momento. O utilizador apenas terá de alterar o campo relativo à disponibilidade, como evidencia a Figura 3.6. Se o veículo

se encontrar disponível a opção será “Sim” e se o veículo se encontrar ocupado ou fora de serviço a opção será “Não”. Posto isto, o utilizador terá de pressionar o botão “Voltar ao planeamento” de modo a prosseguir o planeamento.

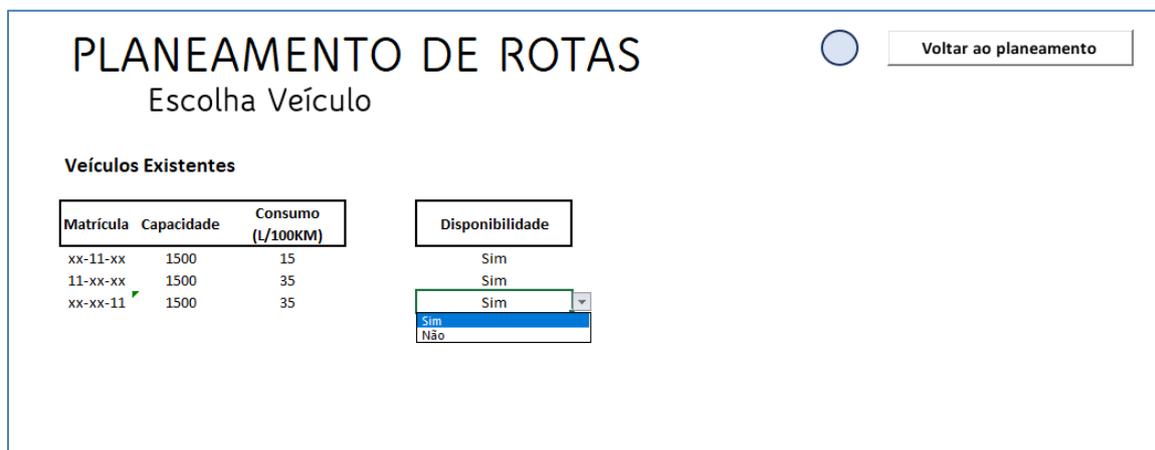


Figura 3.6. Página relativa à disponibilidade dos veículos.

Assim que o botão “Voltar ao planeamento” é acionado, a aplicação volta à página relativa ao “Novo Planeamento” com toda a informação que foi adicionada durante o processo, tal como indica a Figura 3.7.

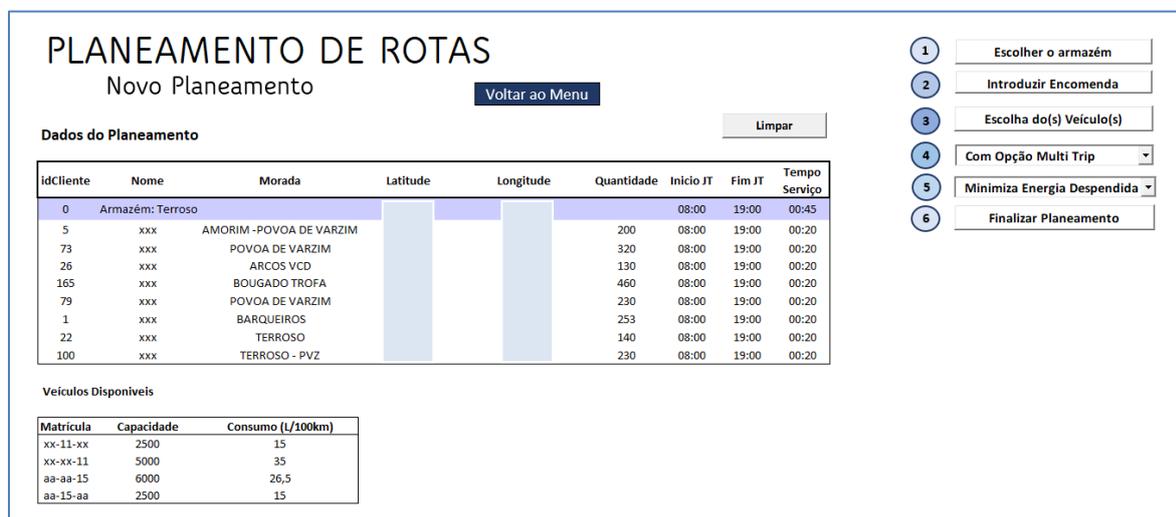


Figura 3.7. Informação adicionada relativa ao planeamento.

A etapa seguinte passa pelo estabelecimento, ou não, da opção *multi trip*. De relembrar que esta opção permite que o veículo efetue uma entrega e volte ao depósito central para o levantamento da seguinte, ao invés de transportar de uma só vez a carga de diversos clientes.

A penúltima etapa passa pela escolha da função a usar, sendo que o utilizador pode escolher entre três opções:

- Minimiza a distância total a percorrer;
- Minimiza os custos totais;
- Minimiza a energia despendida.

A implementação das três funções ao invés de apenas implementar a função desenvolvida no presente documento que visa minimizar os custos totais, deveu-se aos resultados obtidos no Capítulo 4, que evidenciam resultados benéficos para todas as funções, dependendo das especificações de cada organização.

Com toda a informação necessária adicionada, o último passo é pressionar o botão “Finalizar planeamento” de modo a que as rotas sejam traçadas com o intuito de minimizar os custos totais.

Assim que o botão é pressionado, passados alguns minutos, surge a página representada na Figura 3.8 onde as rotas finais se encontram evidenciadas, assim como os detalhes relativos à hora de chegada e partida dos diferentes pontos e os veículos atribuídos.

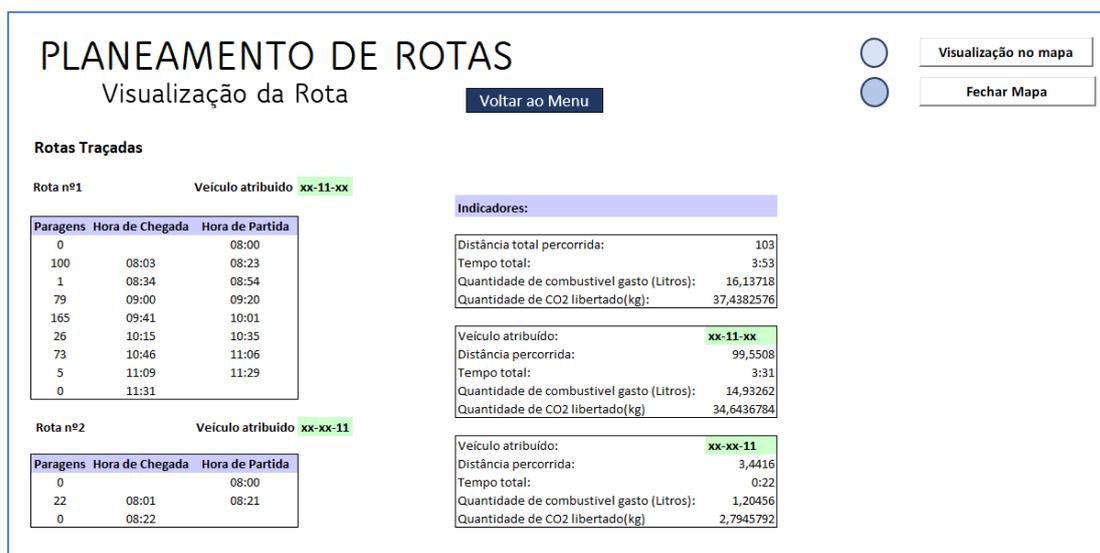


Figura 3.8. Página relativa à opção “Finalizar Planeamento”.

A página inclui ainda informações acerca do planeamento de rotas obtido, tal como a distância total a percorrer, o tempo total de trabalho, a quantidade de combustível gasta pelos veículos e a quantidade de CO₂ que será libertado. Uma vez que os diferentes veículos possuem taxas de consumo de combustível diferentes entre si, incorporou-se uma função que verificará qual o veículo atribuído aquela rota e com essa informação, acederá à

base de dados existente para o levantamento do consumo de combustível em litros por 100 km, o que permitirá o cálculo do consumo de combustível.

De notar que, tal como foi mencionado anteriormente, foram usadas instâncias reais sendo que as distâncias entre os diferentes pontos foram sobredimensionadas por questões de confidencialidade.

O utilizador poderá proceder à visualização da rota através da opção “Visualização no mapa”. Assim que o botão é pressionado, aparecerá um mapa com as rotas traçadas e os veículos que as efetuarão, tal como mostra a Figura 3.9. Neste mapa, os clientes estão representados por pontos com o respetivo Id e o depósito central está representado por um quadrado preto de maiores dimensões, com o intuito de uma melhor compreensão, visto que algumas localizações são bastante próximas.

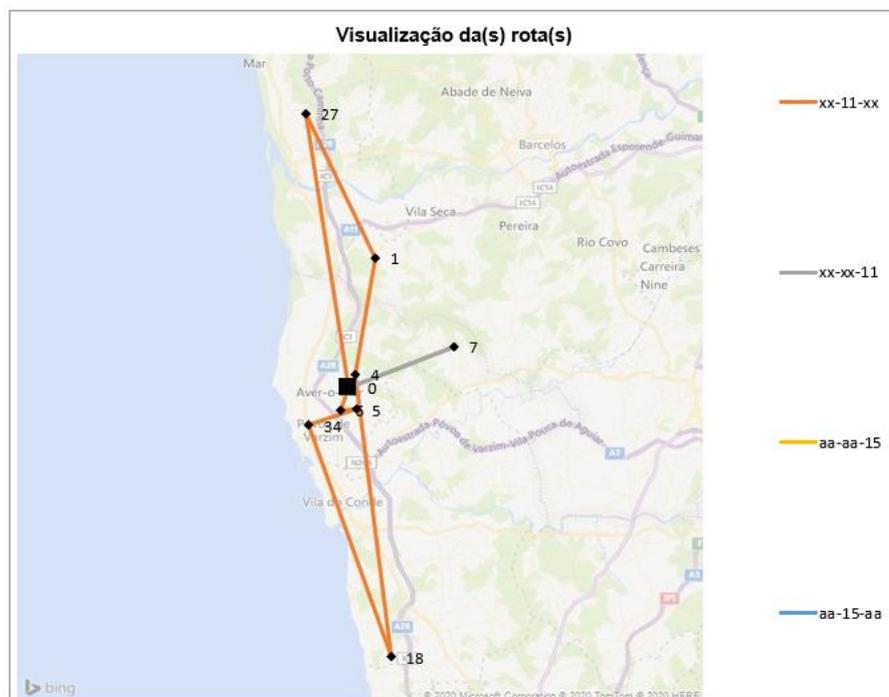


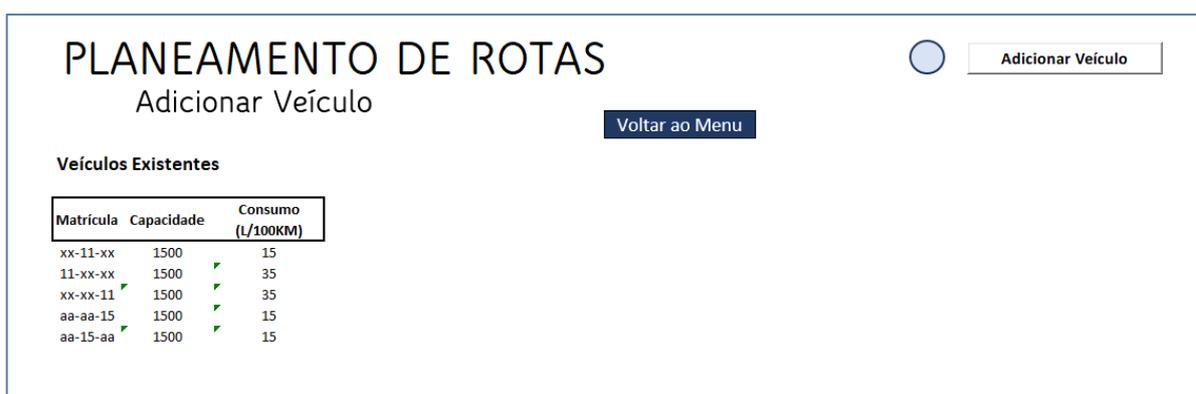
Figura 3.9. Opção “Visualização da(s) rota(s)”.

Como é possível observar, o veículo representado a laranja parece estar a efetuar duas rotas. Tal deve-se ao facto de que a opção *multi trip* permite que o veículo volte ao depósito as vezes necessárias, sendo considerado como apenas uma rota.

Opção: Adicionar Veículo

Tal como já foi mencionado, uma das alterações ao modelo inicial do PRP foi a possibilidade do modelo de decisão se aplicar a empresas com frotas de veículos heterogéneas. Como tal, este sistema terá em consideração as características de cada um dos veículos da frota, mesmo que estas possam variar de veículo para veículo. O utilizador poderá adicionar veículos à aplicação desde que possua toda a informação técnica dos mesmos.

Assim que a opção “Adicionar Veículo” é escolhida, aparecerá a página relativa a esta opção, tal como se observa na Figura 3.10. A página evidencia um breve resumo das características principais dos veículos já existentes.



The screenshot shows a web interface for route planning. At the top, it says 'PLANEAMENTO DE ROTAS' and 'Adicionar Veículo'. There are two buttons: 'Adicionar Veículo' and 'Voltar ao Menu'. Below this is a section titled 'Veículos Existentes' containing a table with the following data:

Matrícula	Capacidade	Consumo (L/100KM)
xx-11-xx	1500	15
11-xx-xx	1500	35
xx-xx-11	1500	35
aa-aa-15	1500	15
aa-15-aa	1500	15

Figura 3.10. Página relativa à opção “Adicionar Veículo”.

Caso o utilizador pretenda adicionar algum veículo, terá de pressionar a opção “Adicionar Veículo” onde aparecerá um formulário que terá de ser preenchido na sua totalidade. Como é possível verificar pela Figura 3.11, para a introdução de um novo veículo é necessário que o utilizador possua informação específica acerca do mesmo, uma vez que será esta informação que permitirá minimizar os custos associados às emissões de GEE por parte do veículo em questão, quando a função escolhida é a de minimização dos custos totais.

Figura 3.11. Formulário para a introdução de veículos.

Assim que o botão “Concluído” é pressionado, todos os dados do veículo serão adicionados à base de dados existente, sendo que a matrícula, o consumo e a capacidade do veículo serão adicionados à página inicial evidenciada na Figura 3.10.

Opção: Adicionar Cliente

De modo a que a aplicação seja o mais completa possível, criou-se a opção de adicionar novos clientes. Assim que esta opção é selecionada, a aplicação abrirá a página representada na Figura 3.12, onde o utilizador poderá ver, resumidamente, os dados dos clientes. De frisar que nesta página também é possível a observação dos últimos clientes adicionados.

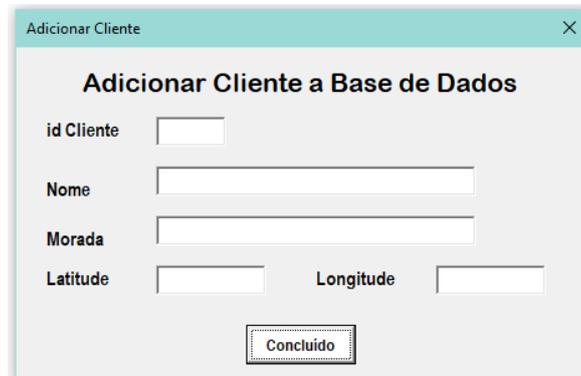
Clientes existentes na Base de Dados		
id Cliente	Nome	Morada
15	xxx	BARQUEIROS
16	xxx	ESPOSENDE
20	xxx	POVOA DE VARZIM
22	xxx	POVOA DE VARZIM
41	xxx	AMORIM-POVOA DE VARZIM
48	xxx	AMORIM-POVOAVARZIM
70	xxx	RATES
91	xxx	VILA DO CONDE
93	xxx	POVOA DE VARZIM
97	xxx	POVOA DE VARZIM
121	xxx	POVOA DE VARZIM
135	xxx	VILA DO CONDE
150	xxx	TERROSO POVOA DE VARZIM
207	xxx	POVOA DE VARZIM
210	xxx	POVOA DE VARZIM

Clientes adicionamos recentemente		
id Cliente	Nome	Morada
1	xxx	ESPOSENDE
2	xxx	VILA DO CONDE
3	xxx	COIMBRA
4	xxx	LISBOA

Figura 3.12. Página relativa à opção “Adicionar Cliente”

Para que o utilizador possa adicionar novos clientes, é necessário que clique no botão “Adicionar Cliente”, que levará ao aparecimento do formulário representado na Figura

3.13. Este, terá de ser preenchido com o Id que identificará o cliente, o nome, a morada, as coordenadas e as restrições quanto à carga, caso estas existam.



Adicionar Cliente

Adicionar Cliente a Base de Dados

id Cliente

Nome

Morada

Latitude Longitude

Concluído

Figura 3.13. Formulário a ser preenchido com os dados do cliente

Caso o Id introduzido já esteja em uso, uma mensagem de aviso será emitida e o procedimento não poderá avançar até que seja introduzido um id válido. Para além disso, caso o utilizador cometa algum erro na introdução das coordenadas, tal como a inserção de algum carácter alfabético, a aplicação retornará uma mensagem de erro.

Assim que o cliente é adicionado aparece uma mensagem a informar o utilizador que a ação foi realizada com sucesso.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Dado que o principal objetivo desta dissertação se prende no desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão que permitirá o planeamento de rotas com preocupações ambientais, é fundamental avaliar o impacto que este planeamento poderá ter nas emissões de GEE.

4.1. Resultados obtidos

Para a obtenção dos resultados, realizou-se o planeamento de diversas entregas variando alguns parâmetros tais como, janelas temporais dos clientes, quantidade de carga a transportar, número de veículos disponíveis para operar as rotas e ainda a possibilidade ou não da rota poder ser efetuada com a opção *multi trip*. Tal como já foi explicado anteriormente, esta opção permite que o veículo realize uma entrega e possa voltar ao depósito central para carregar a mercadoria para a entrega seguinte e assim sucessivamente, ao invés de transportar a carga para diversos clientes de uma só vez.

A obtenção do planeamento de rotas é possível devido à utilização de métodos heurísticos desenvolvidos por Erdoğan (2017), particularmente a meta-heurística *Large Neighbourhood Search* que inclui na sua formulação heurísticas clássicas, nomeadamente heurísticas construtivas e de melhoria.

Este planeamento foi realizado segundo três funções. Uma função que pretende apenas minimizar a distância a percorrer, já evidenciada com *Vehicle Routing Problem*, a função apresentada neste documento que visa diminuir os custos totais associados ao planeamento de rotas obtido e se baseia no *Pollution-Routing Problem* e por fim, uma outra função também baseada no *Pollution-Routing Problem* que pretende minimizar a energia envolvida no processo.

Com o intuito de tornar este sistema de apoio à decisão o mais próximo da realidade possível, foram considerados alguns pressupostos:

- O depósito central tem como horário de funcionamento: 8:00 - 19:00;
- A duração limite de uma viagem é de 7 horas;

- O tempo de carregamento no depósito central é de 45 minutos;
- O tempo de serviço em cada cliente é de 20 minutos;
- Os veículos circulam a uma velocidade média de 70km/h.

Contudo, apesar do estabelecimento destes pressupostos o utilizador pode alterá-los com facilidade se assim o entender.

A variação dos diferentes parâmetros para a obtenção dos resultados inclui o planeamento de diferentes entregas para 33 clientes, o uso alternado do depósito escolhido para efetuar as entregas, visto que existem 3 na base de dados, variações nas janelas temporais dos clientes e ainda o revezamento dos veículos disponíveis. A apresentação completa das instâncias utilizadas encontra-se no ANEXO A.

Uma vez que as funções apresentam restrições e funções objetivo diferentes, os parâmetros de comparação serão:

- Distância percorrida em quilómetros;
- Tempo total de trabalho em horas;
- Quantidade de combustível consumido;
- Quantidade de emissões de CO₂ libertadas;

O tempo total de trabalho engloba o tempo de viagem e o tempo de serviço nos diferentes clientes, ou seja, a totalidade de horas desde o momento em que o veículo é carregado no depósito central até ao momento que este regressa ao depósito. Para o cálculo da quantidade de combustível consumido, o modelo tem em conta o consumo de cada veículo por cada cem quilómetros. Por fim, a quantidade libertada de CO₂ foi calculada tendo em consideração que um litro de combustível liberta, em média, 2.32 kg de CO₂ (EPA, 2005). De notar que a função desenvolvida e que visa minimizar os custos totais pretende minimizar as emissões de GEE uma vez que existe um custo associado a estas. Contudo, apenas as emissões de CO₂ serão quantificadas através da relação evidenciada anteriormente.

Análise da opção *Multi Trip*

O primeiro passo consistiu na avaliação do impacto que a opção multi trip teria na função desenvolvida no presente documento que visa minimizar os custos totais. Isto é, analisar se é preferível que o veículo transporte a carga de diversos clientes e volte ao depósito, terminando assim a rota, ou se acarreta mais benefícios o veículo realizar as entregas de menos clientes e possa voltar ao depósito as vezes necessárias. De notar que esta

opção não implica um aumento do número de veículos pertencente à frota, uma vez que o mesmo veículo poderá efetuar múltiplas viagens para efetuar o planejamento de rotas obtido. Os resultados alcançados encontram-se evidenciados na Tabela 4.1 na forma numérica e no Gráfico 4.1 na forma percentual a distância total, a quantidade de combustível consumido e as emissões libertadas por parte dos veículos.

Tabela 4.1. Valores obtidos com e sem opção *Multi Trip* para a função desenvolvida.

		Nº rotas	Distância total [km]	Tempo Total [horas]	Quantidade combustível [litros]	Utilização média	Emissões CO ₂ [Kg]
Rota 1	s/ Multi Trip	2	186	11:40	51,15	65%	118,668
	c/ Multi Trip	1	177	07:48	26,55	86%	61,596
Rota 2	s/ Multi Trip	2	410	07:52	108,74	73%	252,2768
	c/ Multi Trip	1	532	10:50	79,8	70%	185,136
Rota 3	s/ Multi Trip	2	132	03:34	32,11	62%	74,4952
	c/ Multi Trip	1	128	03:46	19,16	75%	44,4512
Rota 4	s/ Multi Trip	3	186	05:58	39,79	60%	92,3128
	c/ Multi Trip	3	127	05:46	31,21	40%	72,4072
Rota 5	s/ Multi Trip	2	404	07:09	97,7	59%	226,664
	c/ Multi Trip	1	407	07:56	61,02	72%	141,5664
Total	s/ Multi Trip	11	1318	36:13	329,49	64%	764,42
	c/ Multi Trip	7	1371	36:06	217,74	69%	505,15

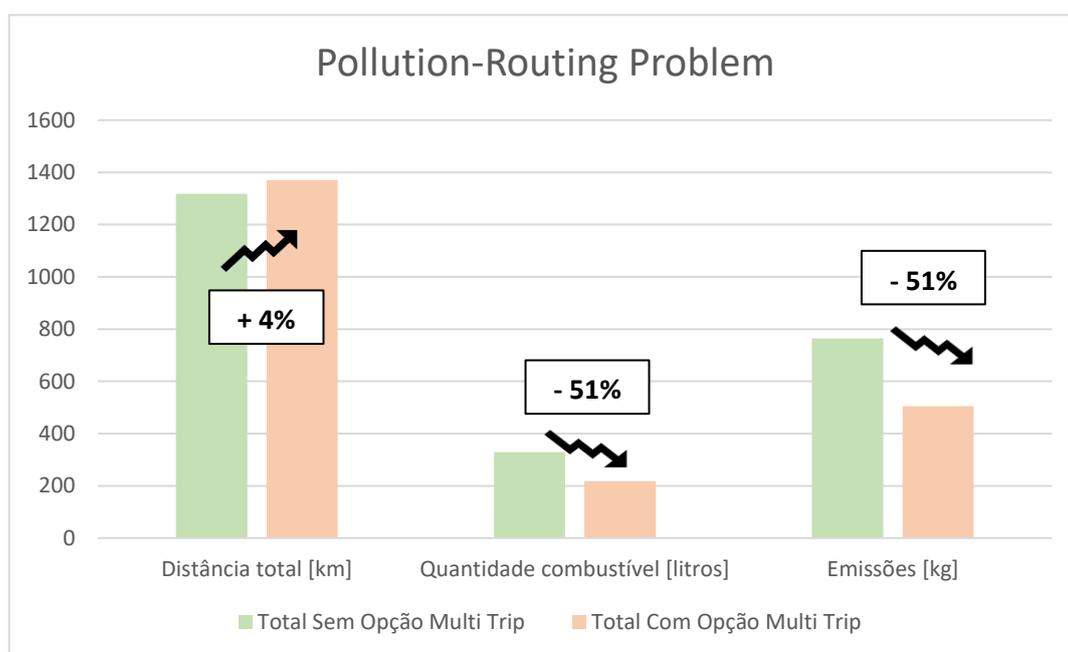


Gráfico 4.1 Comparação dos resultados obtidos considerando ou não a opção *multi trip*.

Tal como é possível observar, a distância a percorrer é superior na funcionalidade *multi trip*, cerca de 4%, o que seria expectável uma vez que o veículo volta várias vezes ao depósito central para carregar a carga. Contudo, este aumento não se reflete na quantidade de combustível consumido que diminui cerca de 51%. Esta diminuição deve-se ao uso de veículos pertencentes à frota que possuem consumos de combustível diferentes de veículo para veículo, tal como evidencia a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Consumos de combustível dos veículos pertencentes à frota por cada cem quilómetros

Veículos pertencentes à frota	Consumo Combustível (litro/100 km)
xx-11-xx	15
xx-xx-11	35
aa-aa-15	26,5
aa-15-aa	15

Quando a opção *multi trip* não se encontra ativa e se pretende transportar bens a diferentes clientes, talvez seja preferível recorrer ao uso de um veículo com uma grande capacidade de carga. Contudo, se o veículo puder voltar ao depósito para carregar as encomendas seguintes, pode-se recorrer a um veículo com menor capacidade de carga e que apresenta um menor consumo de combustível caso esta escolha gere melhores resultados, o que torna possível esta diminuição do consumo de combustível apesar do aumento da distância a percorrer, podendo consequentemente levar a um maior aproveitamento da capacidade de carga do veículo, que é precisamente o que se verifica.

Relativamente à quantidade de emissões de CO₂, o gráfico evidencia o que seria esperado, uma diminuição de 51% já que este cálculo apenas depende da quantidade de combustível consumido, como já foi mencionado.

De notar que se o utilizador ativar esta opção não significa que o veículo transportará a carga de um ou vários clientes e volte obrigatoriamente ao depósito para efetuar o carregamento das entregas seguintes. Esta opção permite que o veículo possa realizar esse procedimento, mas se se obterem resultados mais favoráveis sem a opção *multi trip*, então a solução obtida assim o fará.

Assim sendo, o utilizador beneficiará se esta opção estiver ativa uma vez que a solução devolvida é sempre a que obtém melhores resultados e tal como foi observado, esta opção permite a redução das emissões de CO₂ para a atmosfera.

Comparação entre o *Vehicle Routing Problem* e o *Pollution Routing Problem* através da função desenvolvida que visa diminuir os custos totais

De modo a verificar se a função desenvolvida resulta numa diminuição das emissões libertadas, procedeu-se à comparação desta função com a função do *Vehicle Routing Problem*. De notar que a função desenvolvida pretende minimizar os custos totais, nomeadamente os custos associados ao consumo de combustível, às emissões de GEE, à carga a transportar, à velocidade média, ao condutor e por fim, as penalidades que podem vir a ser aplicadas, enquanto que a função do *Vehicle Routing Problem* visa minimizar as distâncias totais a percorrer.

Para esta comparação assumiu-se que ambos os modelos consideravam a possibilidade de o veículo realizar multi trip, uma vez que esta possibilidade resulta em benefícios tal como foi demonstrado, sendo que os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.3 para o modelo *Vehicle Routing Problem* e na Tabela 4.4 para a função desenvolvida no presente documento. No Gráfico 4.2 encontra-se a comparação da distância total a percorrer, da quantidade de combustível consumido e das emissões libertadas para as duas funções em termos percentuais.

Tabela 4.3. Resultados obtidos relativamente ao modelo *Vehicle Routing Problem*.

		Nº rotas	Distância total [km]	Tempo Total [horas]	Quantidade combustível [litros]	Utilização média	Emissões CO ₂ [Kg]
Rota 1	c/ Multi Trip	1	153	7:48	53,4	86%	123,88
Rota 2	c/ Multi Trip	1	197	5:20	52,2	88%	121,10
Rota 3	c/ Multi Trip	1	112,7	3:20	39,44	75%	91,50
Rota 4	c/ Multi Trip	1	92	5:06	24,38	76%	56,56
Rota 5	c/ Multi Trip	1	222,4	5:00	78,55	72%	182,23
Total	c/ Multi Trip	5	777,1	26:34	247,97	79%	575,30

Tabela 4.4. Resultados obtidos relativamente à função desenvolvida no presente documento.

		Nº rotas	Distância total [km]	Tempo Total [horas]	Quantidade combustível [litros]	Utilização média	Emissões CO ₂ [Kg]
Rota 1	c/ Multi Trip	1	177	07:48	26,55	86%	61,60
Rota 2	c/ Multi Trip	1	532	10:50	79,8	88%	185,14
Rota 3	c/ Multi Trip	1	128	03:46	19,16	75%	44,45
Rota 4	c/ Multi Trip	3	127	05:46	31,21	40%	72,40
Rota 5	c/ Multi Trip	1	407	07:56	61,02	72%	141,56
Total	c/ Multi Trip	7	1371	36:06	217,74	72%	505,15

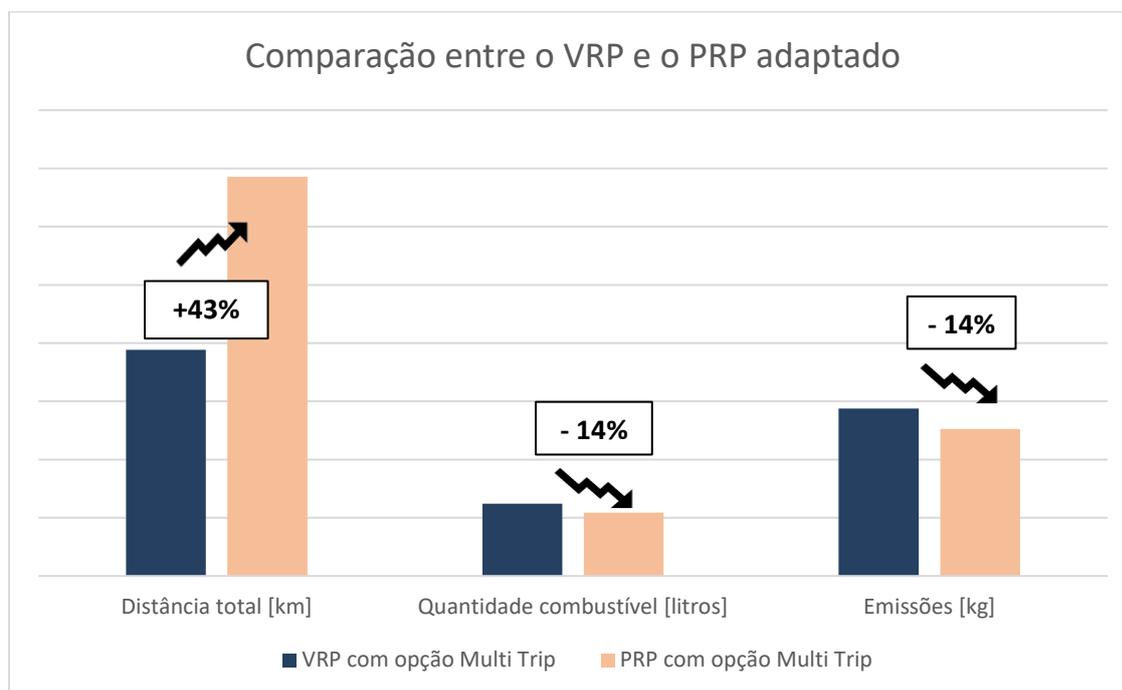


Gráfico 4.2. Comparação das duas funções com a opção *Multi Trip*.

Uma vez que o *Vehicle Routing Problem* tem como principal objetivo a diminuição da distância total a percorrer, já era expectável que existisse uma enorme diferença nas duas funções, mais concretamente de 43% na distância total a percorrer. Contudo, apesar da distância a percorrer ser substancialmente maior na função desenvolvida neste documento, este aumento não se reflete na quantidade de combustível consumido e nas emissões libertadas, já que estes parâmetros apresentam uma diminuição de cerca de 14%. Tal deve-se ao facto de que a função desenvolvida pretende diminuir os custos totais e existe um custo associado tanto ao consumo de combustível como às emissões emitidas. Assim sendo, a aplicação retornará a solução que minimiza estes custos, o que traduz no uso de veículos que irão consumir menos quantidade de combustível. Existem ainda os custos inerentes ao condutor, que apesar de serem uma parcela significativa acabam por não influenciar negativamente os custos totais.

Através da Tabela 4.5 é possível observar que existe uma poupança de 160,32 litros de combustível por cada 1000 km resultando numa poupança de 371,94 kg de emissões, utilizando a função desenvolvida ao invés do *Vehicle Routing Problem*.

Tabela 4.5. Valores por cada 1000 km nos dois modelos.

	Combustível Consumido [litros]	Emissões CO ₂ [kg]
Vehicle Routing Problem	319,137	740,40
Pollution-Routing Problem	158,8	368,5
Poupança	160,32	371,94

Análise do impacto da velocidade média do veículo

Parecendo existir algum potencial na função desenvolvida, procedeu-se à análise do impacto que a velocidade média tem no planeamento de rotas a obter. Tal como já foi mencionado, para a obtenção dos resultados considerou-se que a velocidade média dos veículos era de 70 km/hora. Assim sendo, procedeu-se à análise dos resultados caso a velocidade média seja de 50 km/hora. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.6 para a velocidade média de 50 km/h e na Tabela 4.4, evidenciada anteriormente, para a velocidade média de 70 km/h. No Gráfico 4.3 e Gráfico 4.4 encontram-se os resultados em termos percentuais.

Na Tabela 4.6 foram adicionadas setas de modo a auxiliar na comparação dos resultados obtidos, uma vez que a tabela relativa aos dados quando o veículo circula a 70km/hora não se encontra nesta secção. As setas representadas na cor vermelha evidenciam uma diminuição do parâmetro em questão face aos resultados obtidos quando o veículo circula a 70 km/hora. O contrário acontece quando a seta representada é na cor verde. No caso da distância total a percorrer, a seta é na cor vermelha, o que significa que este parâmetro apresenta valores inferiores relativamente à situação em que o veículo circula a 70 km/hora.

Tabela 4.6. Resultados obtidos relativamente à velocidade média de 50 km/h no modelo desenvolvido.

		Nº rotas	Distância total [km]	Tempo Total [horas]	Quantidade combustível [litros]	Utilização média	Emissões CO ₂ [Kg]
Rota 1	c/ Multi Trip	1	145	07:50	50,8	86%	117,85
Rota 2	c/ Multi Trip	1	484	09:56	72,64	88%	168,52
Rota 3	c/ Multi Trip	1	135	04:30	20,29	75%	47,07
Rota 4	c/ Multi Trip	2	92	05:17	28,77	46%	66,74
Rota 5	c/ Multi Trip	1	407	09:52	61,02	72%	141,56
Total	c/ Multi Trip	6	1263	37:25	233,52	73%	541,7
		↓	↓	↑	↑	↑	↑

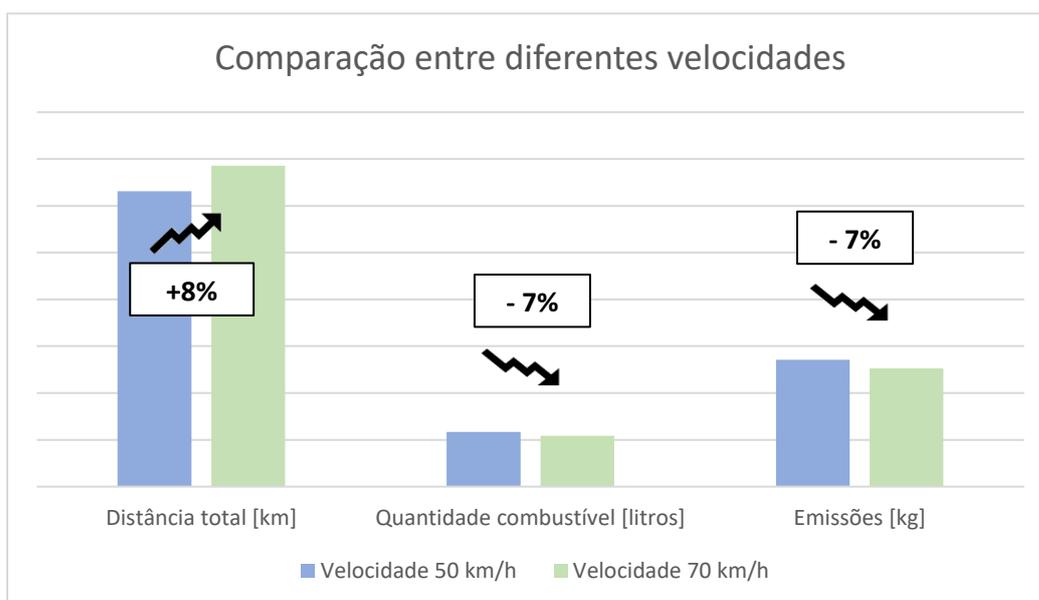


Gráfico 4.3. Comparação entre diferentes velocidades.

Tal como se verifica no Gráfico 4.3, não existem diferenças significativas entre os veículos circularem a uma velocidade média de 50 km/hora ou a 70 km/hora.

A uma velocidade média de 70 km/hora, os resultados obtidos apresentam uma maior distância a percorrer na totalidade. Contudo, mais uma vez, o aumento da distância total a percorrer não resulta necessariamente num aumento da quantidade de combustível, o que se deve aos motivos explicados anteriormente que envolvem os diferentes consumos dos veículos. A redução nas emissões libertadas quando o veículo circula a uma velocidade média de 70 km/hora é na mesma proporção que a quantidade de combustível consumido.

Ao analisar-se o Gráfico 4.4, é perceptível que o tempo total gasto nos percursos é superior quando o veículo circula a uma velocidade média de 50 km/hora, cerca de 4%. Este aumento reflete-se nos custos com o condutor uma vez que dependem da carga horária. Contudo, a diferença mais significativa ocorre nos custos relacionados com as emissões, carga a transportar e com o consumo de combustível, cerca de 25%. Tal deve-se ao facto de que o cálculo deste custo está relacionado com as características técnicas de veículo entre elas, a massa do veículo, a área da superfície frontal, entre outros, e ainda a velocidade média a que circula o veículo, levando assim a uma diferença considerável.

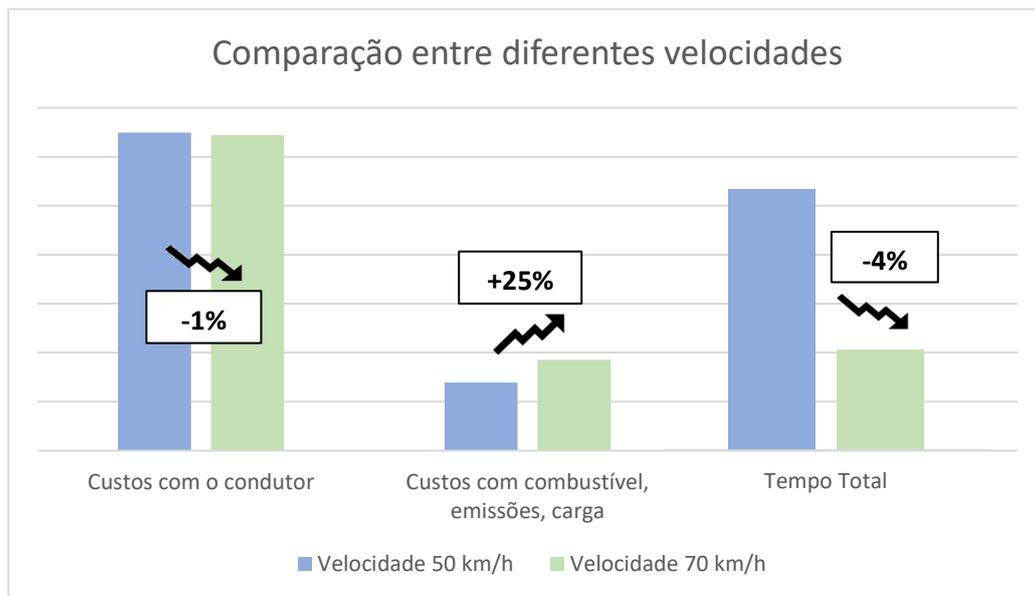


Gráfico 4.4. Comparação entre diferentes velocidades.

Analisou-se ainda os valores dos parâmetros por 1000 quilómetros, como se observa pela Tabela 4.7. Como é possível verificar, de uma forma geral, existe uma poupança generalizada quando os veículos circulam a uma velocidade média de 70 km/hora. Em 1000 km, se o veículo circular a 70 km/hora são poupados 60,49 quilogramas de CO₂. Este valor é bastante significativo se tivermos em conta que, segundo o INE (2019) no ano de 2018 foram percorridos 511 674 milhares de quilómetros por veículos pesados de mercadorias, perfazendo um total de 30 951 160 260 kg de CO₂ poupados.

Tabela 4.7. Valores por cada 1000 km consoante a velocidade média.

	Combustível Consumido [litros]	Emissões CO₂ [kg]	Custos com o Condutor [€]	Custos com a Carga, Combustível e Emissões [€]
50 km/h	184,48	428,9	257,05	55,01
70 km/h	158,82	368,45	234,79	67,56
Poupança	25,66	60,49	22,25	-12,54

Em suma, a função desenvolvida poderá trazer bastantes benefícios para as organizações uma vez que a sua função objetivo pretende minimizar os custos totais e resulta ainda numa diminuição das emissões libertadas para a atmosfera.

Comparação entre diferentes funções de cariz ambiental

Tal como em Bektaş & Laporte (2011), foi efetuada uma análise adicional no sentido de se verificarem diferenças nos resultados obtidos com a variação da função objetivo. Nesse sentido, é adotada para o PRP uma função objetivo que visa a minimização da energia consumida no transporte.

A função objetivo desta nova variante encontra-se evidenciada na equação (4.1) e a função objetivo que pretende minimizar os custos totais encontra-se ilustrada em (4.2).

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} d_{ij} \beta \left(\sum (\bar{v}^r)^2 z^r_{ij} \right) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} d_{ij} w x_{ij} + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) \alpha_{ij} f_{ij} d_{ij} + \\ & + \sum_{(i,j) \in \mathcal{A}} (c_f + e) d_{ij} \beta \left(\sum (\bar{v}^r)^2 z^r_{ij} \right) + \sum_{j \in N_0} p s_j \end{aligned} \quad (4.2)$$

Visto se tratarem de variantes do *Pollution-Routing Problem*, as diferenças entre as funções objetivo são muito reduzidas. Diferenciam-se apenas nos custos relacionados com o condutor e nos parâmetros que dizem respeito ao custo com as emissões e com o consumo de combustível que apenas são considerados na função que pretende minimizar os custos totais.

Os resultados obtidos da função que visa minimizar a energia despendida encontram-se ilustrados na Tabela 4.8 e na Tabela 4.4 para a função que pretende minimizar os custos totais. No Gráfico 4.5 encontram-se os resultados em termos percentuais.

Tabela 4.8. Resultados obtidos da função que visa minimizar a energia.

		Nº rotas	Distância total [km]	Tempo Total [horas]	Quantidade combustível [litros]	Utilização média	Emissões CO ₂ [Kg]
Rota 1	c/ Multi Trip	1	162	08:34	24,27	86%	56,3064
Rota 2	c/ Multi Trip	1	499	10:27	74,88	70%	173,7216
Rota 3	c/ Multi Trip	1	118	03:54	17,74	75%	41,1568
Rota 4	c/ Multi Trip	2	145	05:59	29,52	63%	68,4864
Rota 5	c/ Multi Trip	1	404	07:54	60,6	72%	140,592
Total	c/ Multi Trip	6	1328	36:48	207,01	73%	480,2632
		↓	↓	↑	↓	↑	↓

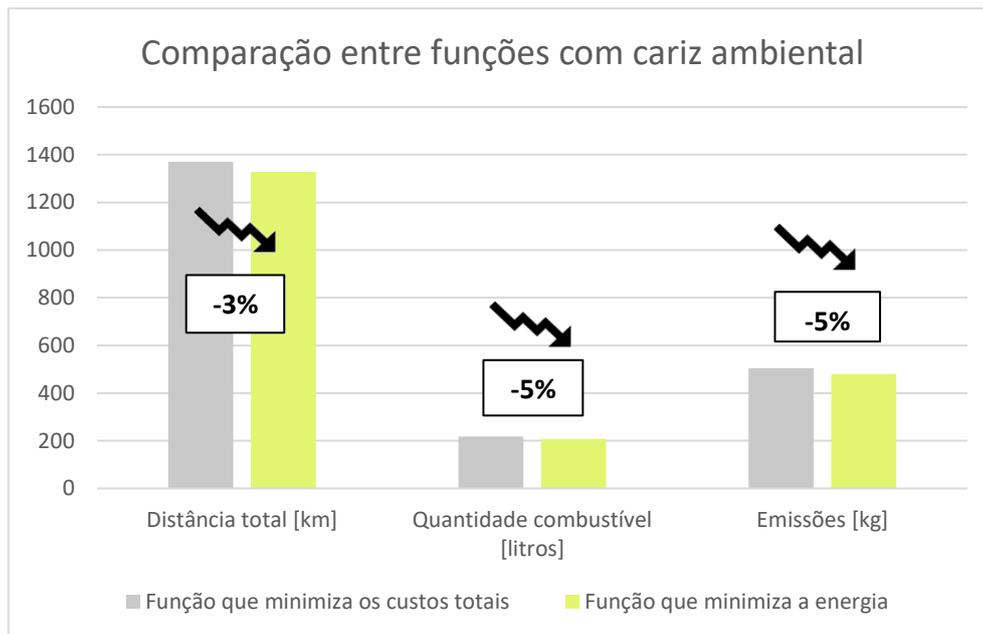


Gráfico 4.5. Resultados obtidos das funções de cariz ambiental.

Como é possível evidenciar, não existem diferenças significativas nos resultados obtidos das duas funções. Tal deve-se ao facto de que ambas as variantes apresentam funções objetivo muito parecidas.

Uma vez que os custos com o condutor têm um peso significativo nos custos totais, seria expectável que o tempo total de trabalho fosse inferior na função que visa minimizar os custos totais.

Comparativamente aos restantes parâmetros, existe uma diminuição de cerca 3% na distância a percorrer e 5% tanto no consumo de combustível como nas emissões libertadas na função que visa minimizar a energia despendida. Enquanto que na função que pretende minimizar os custos totais, o tempo total de trabalho tem um peso significativo uma vez que existem custos associados ao tempo total, nomeadamente os custos com o condutor, o mesmo não se verifica na função que pretende minimizar a energia despendida. Nesta última, a distância a percorrer tem um papel fulcral na energia despendida. Para além disso, como é possível verificar pela tabela anterior esta nova variante apresenta um maior tempo total de trabalho, mas uma distância a percorrer menor face à função que visa minimizar os custos totais. Por outro lado, esta nova função é a única que apresenta uma diminuição da distância total a percorrer aliada a uma diminuição do consumo do combustível e das emissões libertadas. Nas restantes análises verificou-se o aumento da distância a percorrer resultava numa redução do consumo de combustível e das emissões libertadas.

Relativamente aos valores por cada 1000 quilómetros, é possível verificar na Tabela 4.9 que através da função que visa minimizar a energia é possível reduzir o consumo de combustível em 2,94 litros e a libertação de emissões em 6,82 quilogramas de CO₂.

Tabela 4.9. Valores por cada 1000 km consoante a função de cariz ambiental.

	Combustível Consumido [litros]	Emissões CO₂ [kg]
Função desenvolvida que visa minimizar os custos totais	158,82	368,46
Função do Pollution-Routing Problem que visa minimizar a energia despendida	155,88	361,64
Poupança	2,94	6,82

Análise dos resultados obtidos para as três funções

O primeiro passo foi a análise do impacto que a opção *multi trip* teria nas soluções obtidas e tal como foi possível observar, a opção resulta numa redução de 51% no combustível consumido e nas emissões resultantes, para a função do PRP adaptada neste documento.

Seguiu-se a comparação da função desenvolvida com o *Vehicle Routing Problem* com a opção *multi trip* ativada que provou o possível potencial do sistema de apoio à decisão, uma vez que os resultados evidenciavam uma diminuição de cerca de 14% na quantidade de emissões libertadas pelos veículos de transporte de cargas.

Posto isto, procedeu-se à alteração da velocidade média do veículo de 70 km/hora para 50 km/hora de modo a verificar as implicações desta redução. Verificou-se que existia um menor consumo de combustível quando o veículo circula a uma velocidade média de 70 km/hora.

Por fim, uma nova função de cariz ambiental foi adaptada do *Pollution-Routing Problem* que visa minimizar a energia despendida. Os resultados obtidos são melhores para esta nova função face à função desenvolvida no presente documento que visa a minimização dos custos totais, uma vez que existe uma redução das emissões em 5%.

Os resultados totais das três funções encontram-se exibidos na Tabela 4.10 e no Gráfico 4.6.

Tabela 4.10. Comparação das três funções.

	Nº rotas	Distância total [km]	Tempo Total [horas]	Quantidade combustível [litros]	Utilização média	Emissões CO ₂ [Kg]
Vehicle Routing Problem: Minimização da distância total a percorrer	5	777,1	26:34:00	247,97	79%	575,29
Pollution-Routing Problem: Minimização de custos totais	7	1371	36:06:00	217,74	72%	505,15
Pollution-Routing Problem: Minimização da energia despendida	6	1328	36:48:00	207,01	73%	480,26

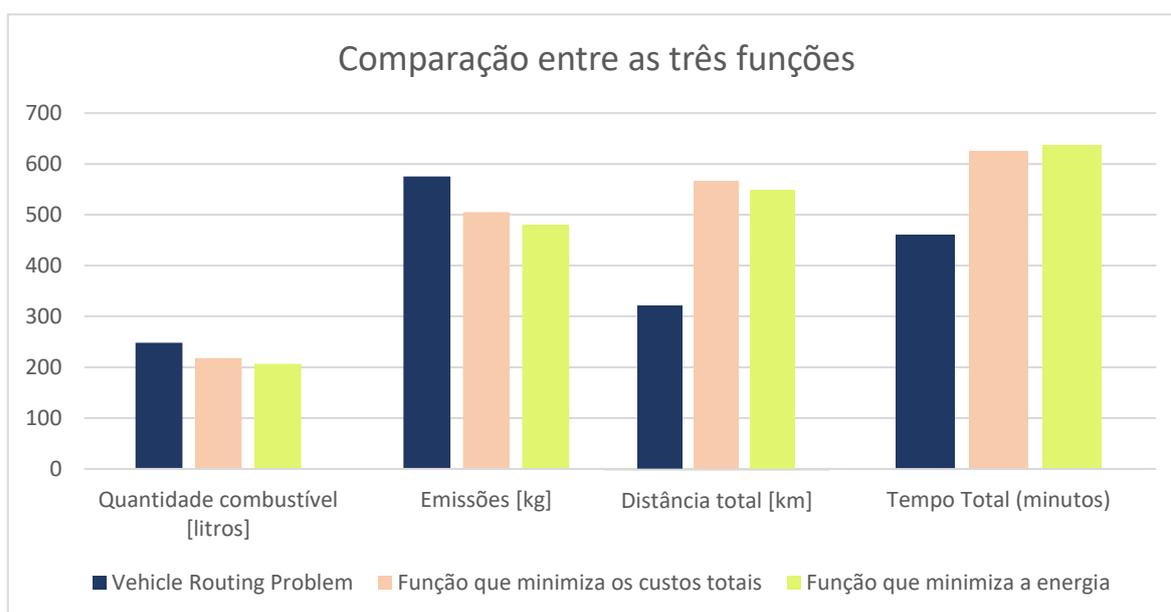


Gráfico 4.6. Comparação entre as três funções apresentadas.

Tal como é possível observar, a função do Vehicle Routing Problem apresenta menor distância a percorrer e menor tempo total de trabalho. Contudo, é a função que apresenta maior quantidade de combustível consumido e maior quantidade de emissões libertadas. Assim sendo, as funções de cariz ambiental podem resultar em benefícios para as organizações uma vez que proporcionam um planeamento mais monitorizado aliado a uma diminuição nas quantidades de CO₂ libertadas para a atmosfera.

Face aos resultados obtidos, as três funções foram implementadas no sistema de apoio à decisão. Cabe ao utilizador optar por uma das funções para a obtenção do planeamento de rotas, tendo em conta as especificações da organização.

5. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

No presente capítulo encontram-se evidenciadas algumas conclusões, assim como alguns aspetos que poderão ser desenvolvidos no futuro de modo a que o sistema de apoio à decisão se torne o mais completo possível.

5.1. Conclusão

Uma gestão eficiente e eficaz é fundamental para o bom funcionamento de uma organização, sendo um fator importante que poderá elevar a sua posição no mercado em que se insere. Assim sendo, o objetivo da presente dissertação foca-se no desenvolvimento de uma ferramenta que permitirá um planeamento das rotas mais consciente.

O primeiro passo assentou numa pesquisa focada no *Vehicle Routing Problem* e nas suas variantes, assim como nos possíveis métodos de solução. Surge então a variante *Pollution-Routing Problem* que serviu como base ao modelo desenvolvido. Esta escolha deveu-se à importância que a temática das alterações climáticas possui, assim como o facto de a indústria dos transportes ser responsável por uma elevada percentagem das emissões de GEE na atmosfera.

O sistema desenvolvido incorpora três funções que visam minimizar diferentes parâmetros. A primeira função foi desenvolvida por Erdoğan (2017) pretende minimizar a distância total a percorrer. A segunda função foi desenvolvida no presente documento e pretende minimizar os custos totais associados ao planeamento de rotas, nomeadamente os custos associados ao transporte das cargas, os custos incorridos do consumo de combustível e emissões libertadas e por fim os custos associados aos condutores. E por fim, a terceira função pretende minimizar a energia despendida e tal como a função desenvolvida neste documento é de cariz ambiental.

Começou-se pela recolha de dados de entrada através de um problema real, sendo que se recorreu ao sobredimensionamento das instâncias por questões de confidencialidade. Posto isto, iniciou-se o desenvolvimento do modelo de apoio à decisão onde se teve em conta diversos parâmetros com o intuito de tornar o modelo o mais real

possível. Parâmetros esses que vão desde restrições relacionadas com as janelas temporais, a disponibilidade dos veículos pertencentes à frota, os tempos de serviços, entre outros. O modelo foi desenvolvido no *Microsoft Excel* com uso da linguagem *Visual Basic*.

Para a obtenção de resultados recorreu-se à comparação da função desenvolvida com a função do *Vehicle Routing Problem* que pretende minimizar as distâncias, com o intuito de aferir se a minimização de custos totais resulta numa diminuição das emissões de GEE. Para além disso, analisou-se o impacto que a funcionalidade *multi trip* tem na distância total a percorrer, na quantidade de combustível consumido e consequentemente nas emissões emitidas.

Os resultados obtidos permitiram verificar que o modelo desenvolvido poderá trazer inúmeros benefícios para as organizações uma vez que para além de ter como função objetivo a minimização dos custos totais permite ainda a redução da quantidade de gases de efeito de estufa que são emitidos para atmosfera.

Face à função que pretende minimizar apenas a distância a percorrer, a função desenvolvida apresenta uma poupança de 371,94 kg de emissões libertadas e 160,32 litros de combustível por cada 1000 km, considerando que em ambos os casos os veículos circulam a uma velocidade média de 70 km/hora. Para além disso, analisou-se ainda o impacto que a velocidade teria nestes parâmetros sendo que se procedeu à comparação entre os veículos circularem a uma velocidade média de 50 km/hora e a 70 km/hora. Os resultados obtidos ditam que existe uma poupança generalizada quando o veículo circula a 70 km/hora, poupando-se 60,49 kg de emissões libertadas e 25,66 litros de combustível, por cada 1000 km. Para além das análises anteriores, comparou-se a função desenvolvida a uma outra função de cariz ambiental que visa minimizar a energia despendida. Verificou-se que esta última função resulta numa diminuição de 5% nas emissões libertadas para a atmosfera.

Em suma, as organizações beneficiarão bastante com a implementação destas ferramentas uma vez que além de permitirem um planeamento das rotas mais rápido e monitorizado permitem ainda a redução da quantidade de emissões libertadas para a atmosfera, nomeadamente de CO₂ que foi possível quantificar no presente documento.

5.2. Trabalho Futuro

De modo a aumentarem a sua competitividade, as organizações optam pela implementação de ferramentas que permitirão um maior controlo das suas atividades, assim como a sua otimização. Contudo, estas ferramentas apesar dos muitos benefícios que apresentam podem sempre ser melhoradas, tal como acontece com o sistema de apoio à decisão evidenciado neste documento.

Uma vez que esta ferramenta não foi desenvolvida para um setor em específico, poderá não considerar as especificidades de um determinado setor, tendo assim de ser customizada de modo a incluir todas as características necessárias.

Adicionalmente, o sistema considera que todas as entregas terão de ser feitas a partir de um único depósito central. Assim sendo, a consideração de vários depósitos dispersos poderá ser uma opção a explorar.

Com o intuito de obter a solução que oferece melhores resultados, a aplicação depende de alguns minutos. De modo a que a velocidade de processamento seja maior, no futuro, poderia recorrer-se a outros algoritmos mais eficientes de forma a tornar a aplicação mais ágil.

Para além da função de cariz ambiental analisada, existem outras que poderão ser estudadas no futuro de forma a entender o seu impacto. Um exemplo são as funções relacionadas com a carga a transportar, uma vez que esta vai variando ao longo do percurso a percorrer.

É expectável que as organizações optem pela implementação deste tipo de ferramentas visto que permite um planeamento mais consciente e uma redução dos custos incorridos das atividades de transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bektaş, T., Demir, E., & Laporte, G. (2015). Green vehicle routing. In *Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solutions*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3_7
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms. *Transportation Science*. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0056>
- Carvalho, J. M. S. (2014). *Introdução à Investigação Operacional*. 67(6), 14–21.
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033>
- Dukkanci, O., Bektaş, T., & Kara, B. Y. (2019). *Green Network Design Problems*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814242-4.00007-7>
- Dukkanci, O., Kara, B. Y., & Bektaş, T. (2019). The green location-routing problem. *Computers and Operations Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.011>
- EEA. (2019). Final energy consumption by sector and fuel in Europe. Retrieved from Agência Europeia do Ambiente website: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-1>
- Eglese, R., & Bektaş, T. (2014). Chapter 15: Green Vehicle Routing. In *Vehicle Routing*. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594.ch15>
- EPA. (2005). Average Carbon Dioxide Emissions Resulting from Gasoline and Diesel Fuel. In *US Environmental Protection Agency*. <https://doi.org/10.1002/ep.10071>

- Erdoğan, G. (2017). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers and Operations Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022>
- Erdoğan, G. (2013). VRP Spreadsheet Solver. Retrieved from <https://people.bath.ac.uk/ge277/vrp-spreadsheet-solver/>
- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., Bektaş, T., & Laporte, G. (2013). The time-dependent pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.008>
- Gaspar Cunha, A., Takahashi, R., & Henggeler Antunes, C. (2012). Manual de computação evolutiva e metaheurística. In *Manual de computação evolutiva e metaheurística*. <https://doi.org/10.14195/978-989-26-0583-8>
- Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., Sorenson, S., & Laboratory, T. R. (1999). Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. In *Deliverable 22 for the project MEET*.
- Hiller, F. S., & Lieberman, G. J. (2005). Introduction - Operations Research. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*.
- INE. (2019). Indicadores dos transportes rodoviários de mercadorias por veículos pesados de mercadorias no Continente. Retrieved from Instituto Nacional de Estatística website: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&userLoadSave=Load&userTableOrder=225&tipoSelecao=1&contexto=pq&selTab=tab1&submitLoad=true
- Kabadurmuş, Ö., Erdoğan, M. S., Özkan, Y., & Köseoğlu, M. (2019). A Multi-Objective Solution of Green Vehicle Routing Problem. *Logistics & Sustainable Transport*, 10(1), 31–44. <https://doi.org/10.2478/jlst-2019-0003>
- Koç, Ç., & Karaoglan, I. (2016). The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach. *Applied Soft Computing Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.064>
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J. Y., & Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2000.tb00200.x>

- Laporte, Gilbert, & Semet, F. (2002). 5. Classical Heuristics for the Capacitated VRP. In *The Vehicle Routing Problem*. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.ch5>
- Microsoft Support. (n.d.). Retrieved from <https://support.microsoft.com/en-us/office/automate-tasks-with-the-macro-recorder-974ef220-f716-4e01-b015-3ea70e64937b>
- Rizzoli, A. E., Montemanni, R., Lucibello, E., & Gambardella, L. M. (2007). Ant colony optimization for real-world vehicle routing problems. *Swarm Intelligence*. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0005-x>
- Roli, A., Benedettini, S., Stützle, T., & Blum, C. (2012). Large neighbourhood search algorithms for the founder sequence reconstruction problem. *Computers and Operations Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.03.012>
- Shaw, P. (1997). A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems. *APES Group, Dept of Computer Science, University of ...*, 1–12.
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>
- Sun, Y., Wang, D., Lang, M., & Zhou, X. (2019). Solving the time-dependent multi-trip vehicle routing problem with time windows and an improved travel speed model by a hybrid solution algorithm. *Cluster Computing*. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2637-6>
- Zhou, M., Jin, H., & Wang, W. (2016). A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D*, 49(5), 203–218. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.008>

ANEXO A

Para a obtenção de resultados, recorreu-se à elaboração de diferentes planos de entregas, variando as especificações das janelas temporais, a quantidade de carga a transportar e a disponibilidade dos veículos. Recorreu-se a uma seleção aleatória de 33 clientes e da sua alocação a 5 planeamentos diferentes. O armazém de onde as entregas seriam realizadas foi também escolhido aleatoriamente. As Tabela 0.1 - Tabela 0.5 evidenciam os diferentes planos de entrega utilizados para a obtenção do planeamento de rotas.

Tabela 0.1. Plano de entregas número 1.

idCliente	Nome	Morada	Quantidade	Início JT	Fim JT	Tempo Serviço
0		Armazém: Terroso		08:00	19:00	00:45
1	xxx	Barqueiros	500	08:00	19:00	00:20
13	xxx	Terroso - Póvoa De Varzim	300	10:15	14:00	00:20
49	xxx	Esposende	600	08:00	19:00	00:30
24	xxx	Vila Do Conde	650	10:00	16:00	00:20
42	xxx	Vila Conde	900	08:00	19:00	00:20
70	xxx	Póvoa De Varzim	900	15:00	19:00	00:45
394	xxx	Esposende	450	08:00	19:00	00:20

Tabela 0.2. Plano de entregas número 2.

idCliente	Nome	Morada	Quantidade	Início JT	Fim JT	Tempo Serviço
0		Armazém: Correlhã		08:00	19:00	00:45
14	xxx	Póvoa De Varzim	500	08:00	19:00	00:20
12	xxx	Vila Do Conde	600	08:00	19:00	00:20
49	xxx	Esposende	600	08:00	19:00	00:20
5	xxx	Amorim - Póvoa De Varzim	600	08:00	19:00	00:20
7	xxx	Rates	630	08:00	19:00	00:20
60	xxx	Amorim	600	08:00	19:00	00:20
60	xxx	Esposende	350	08:00	19:00	00:20
9	xxx	Póvoa De Varzim	640	08:00	19:00	00:20
69	xxx	Póvoa De Varzim	745	08:00	19:00	00:20

Tabela 0.3. Plano de entregas número 3.

idCliente	Nome	Morada	Quantidade	Início JT	Fim JT	Tempo Serviço
0		Armazém: Terroso		08:00	19:00	00:15
1	xxx	Barqueiros	1000	08:00	19:00	00:15
18	xxx	Labruge	20	08:00	19:00	00:15
4	xxx	Póvoa De Varzim	100	08:00	19:00	00:15
6	xxx	Amorim- Povia Varzim	100	08:00	19:00	00:15
5	xxx	Amorim -Povia De Varzim	1000	08:00	19:00	00:15
34	xxx	Póvoa De Varzim	200	08:00	19:00	00:15
7	xxx	Rates	1300	08:00	19:00	00:15
27	xxx	Esposende	25	08:00	19:00	00:15

Tabela 0.4. Plano de entregas número 4.

idCliente	Nome	Morada	Quantidade	Início JT	Fim JT	Tempo Serviço
0		Armazém: Terroso		08:00	19:00	00:15
7	xxx	Rates	1500	08:00	19:00	00:15
23	xxx	Rio Mau	800	11:00	18:00	00:15
14	xxx	Póvoa De Varzim	650	11:00	14:00	00:30
25	xxx	Arcos	950	14:00	19:00	00:15
40	xxx	Mindelo	1800	13:00	19:00	00:15
37	xxx	Esposende	765	12:00	19:00	00:15
33	xxx	Balazar	890	15:00	19:00	00:45
53	xxx	Póvoa De Varzim	900	08:00	19:00	01:00
1	xxx	Barqueiros	900	13:00	17:00	00:15

Tabela 0.5. Plano de entregas número 5.

idCliente	Nome	Morada	Quantidade	Início JT	Fim JT	Tempo Serviço
0		Armazém: Lixa		08:00	19:00	00:45
38	xxx	Póvoa De Varzim	600	08:00	19:00	00:20
39	xxx	Póvoa De Varzim	680	08:00	19:00	00:20
41	xxx	Vila Cha	430	08:00	19:00	00:20
53	xxx	Póvoa De Varzim	530	08:00	19:00	00:20
8	xxx	Vila Do Conde	350	08:00	19:00	00:20
10	xxx	Póvoa De Varzim	350	08:00	19:00	00:20
11	xxx	Póvoa De Varzim	640	08:00	19:00	00:20