



O impacto do congestionamento no roteamento de veículos para a logística urbana

MICHAEL EMANUEL SOARES VIEIRA

novembro de 2020

O IMPACTO DO CONGESTIONAMENTO NO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA A LOGÍSTICA URBANA

Michael Emanuel Soares Vieira
1131472

Outubro de 2020
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Engenharia Mecânica



O IMPACTO DO CONGESTIONAMENTO NO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA A LOGÍSTICA URBANA

Michael Emanuel Soares Vieira
1131472

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor António Galvão Ramos.

Outubro de 2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Mestre/Especialista José Carlos Sá

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor António Galvão Ramos

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Fábio Neves Seabra da Silva Moreira

Investigador, INESC TEC

PALAVRAS CHAVE

Modelo de velocidade, emissões de CO₂, roteamento de veículos, algoritmo genético, GVRP

RESUMO

O tema desta dissertação consiste em perceber o impacto do congestionamento no roteamento de veículos para a logística urbana. Para que esse estudo seja realizado é necessário incorporar o congestionamento num modelo de VRP de forma a avaliar o seu impacto na definição das rotas dos veículos.

De modo a se proceder a este estudo, foi adotado um modelo de cálculo de emissões com a finalidade de diminuir as mesmas e, por consequência, diminuir a utilização dos horários de maior trânsito. De seguida, foi usada uma formulação de VRP em que fosse possível incorporar o modelo de cálculo de emissões.

O problema foi formulado para ser usado como um programa MIP (*Mixed integer programming*).

Foi concluído que a implementação de um modelo de emissões em conjunto com uma formulação VRP leva a que seja possível estudar o congestionamento em zonas urbanas, tendo sido observado que é possível diminuir o uso de horários de congestionamento na logística urbana.

KEYWORDS

Speed model, CO2 emissions, vehicle routing, genetic algorithm, GVRP

ABSTRACT

The theme of this dissertation is to understand the impact of congestion on vehicle routing for urban logistics. For this study to be carried out it is necessary to incorporate congestion into a VRP model to assess its impact on the definition of vehicle routes.

In order to carry out this study, a model for calculating emissions has been adopted with the aim of reducing emissions and thus reducing the use of peak traffic times. A VRP formulation was then used in which the emissions calculation model could be incorporated.

The problem was formulated to be used as a MIP (Mixed integer programming) programme.

It was concluded that the implementation of an emissions model in conjunction with a VRP formulation makes it possible to study congestion in urban areas, and it was observed that it is possible to reduce the use of congestion times in urban logistics.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
PRP	<i>Pollution Routing Problem</i>
GVRP	<i>Green Vehicle Routing Problem</i>
VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>
GL	<i>Green Logistics</i>
TD-GVRP	<i>Time Dependent-Green Vehicle Routing Problem</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GHG	<i>Greenhouse gas</i>
NSGA	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
GA-DP	<i>Generic Algorithm-Dynamic Programming</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
PDP	<i>Pickup and Delivery</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GVRSP	<i>Green Vehicle Routing and Scheduling Problem</i>

Lista de Unidades

mph	Milhas por hora
kJ	Quilojoule
l	Litros
rev	Rotações
kg	Quilograma
s	Segundos

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- TAXA DE VARIAÇÃO ENTRE 2017 E 2018 FONTE: (INE, 2018)	10
FIGURA 2 –EVOLUÇÃO DE TEOR DE CO ₂ FONTE: AGU	11
FIGURA 3- EVOLUÇÃO DE EMISSÕES DE CO ₂ NOS PRINCIPAIS SETORES FONTE: EEA	12
FIGURA 4- <i>DYNAMIC VRP</i> FONTE: (CHEN, 2017)	14
FIGURA 5- EXEMPLO DE ROTA MINIMIZANDO O USO DE ENERGIA FONTE: BEKTAS 2011	17
FIGURA 6- MODELO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM AS EMISSÕES DOS VEÍCULOS FONTE: (ERICSSON, 2001)	19
FIGURA 7- CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE FONTE: (NICOLAI, 2015)	19
FIGURA 8- DADOS AGRUPADOS	28
FIGURA 9- CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DEPENDENTE DOS 3 MÓDULOS	32
FIGURA 10- ROTAS DE DISTÂNCIA PERCORRIDA	40
FIGURA 11- ROTAS DE TEMPO DE VIAGEM	41
FIGURA 12- ROTAS DE EMISSÕES	41
FIGURA 13- UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS	43
FIGURA 14- CONGESTIONAMENTO EM TEMPO DE VIAGEM	43
FIGURA 15- CONGESTIONAMENTO EM DISTÂNCIA PERCORRIDA	44
FIGURA 16- CONGESTIONAMENTO EM EMISSÕES	44
FIGURA 17- PENALIZAÇÕES DE ATRASO	45
FIGURA 18- DISTÂNCIA TOTAL PERCORRIDA	46
FIGURA 19- EMISSÕES TOTAIS	47
FIGURA 20- ROTAS DE POPULAÇÃO 2	49
FIGURA 21- ROTAS DE POPULAÇÃO 3	49
FIGURA 22- VALOR DE EMISSÕES NAS DIFERENTES POPULAÇÕES	50
FIGURA 23-TEMPO DE SIMULAÇÃO	51
FIGURA 24- GAP	51

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1- CAPACIDADE DE CARGA E AUTONOMIA DA FROTA.....	27
TABELA 2- DADOS DOS CLIENTES	28
TABELA 3- PRESSUPOSTOS DOS PERÍODOS DE TEMPO.....	29
TABELA 4- DADOS DO MODELO DE EMISSÕES.....	30
TABELA 5- CONSUMO DE COMBUSTÍVEL POR UNIDADE DE DISTÂNCIA.....	33
TABELA 6- SÍNTESE DE RESULTADOS	48

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura e Organização.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Setor dos transportes.....	9
2.1.1	Impacto económico.....	9
2.1.2	Impacto ambiental	11
2.2	Problema de roteamento de veículos.....	12
2.2.1	<i>Dynamic VRP</i>	13
2.2.2	<i>Capacitated VRP</i>	14
2.2.3	<i>Split-Delivery VRP</i>	15
2.2.4	<i>Fuzzy VRP</i>	15
2.2.5	<i>Open VRP</i>	16
2.3	Green Logistics	16
2.4	Pollution Routing Problem	17
2.5	Green Vehicle Routing Problem.....	18
2.5.1	Fatores de emissão.....	19
2.5.2	Técnicas de estimativa de emissão	20
3	DESENVOLVIMENTO	25
3.1	Descrição do Problema	25
3.2	Pressupostos da formulação	26
3.2.1	Pressupostos dos veículos	26
3.2.2	Pressupostos dos clientes	27
3.2.3	Pressupostos dos períodos de tempo	29
3.3	Cálculo do fator de emissões	29
3.4	Formulação do problema.....	34

3.4.1	Modificações à formulação	38
3.5	Resultados	40
3.5.1	Análise das rotas	40
3.5.2	Análise da utilização de veículos	42
3.5.3	Congestionamento	43
3.5.4	Fatores de performance	45
3.5.5	Variação do perfil de localização dos clientes	48
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	55
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	61

INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura e Organização

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A presente dissertação insere-se na unidade curricular “dissertação/estágio/projeto” do 2º Ano do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Gestão Industrial do departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Politécnico do Porto. O assunto desenvolvido nesta dissertação surgiu do interesse de perceber qual é o impacto de congestionamento no roteamento de veículos para a logística urbana.

O transporte rodoviário é o meio de transporte mais utilizado na Europa, seja este composto por veículos ligeiros ou pesados, de mercadorias ou de passageiros. Em Portugal o setor dos transportes representa cerca de $\frac{1}{4}$ das emissões de CO₂, estando o assunto “*Green Logistics*” cada vez mais em voga e merecendo mais atenção por parte das organizações e do governo. As estratégias logísticas são ainda muito precárias e somente focadas em minimizar os custos diretos das organizações sem que haja um desenvolvimento das estratégias de roteamento das frotas. De modo a fazer um melhor aproveitamento dos seus recursos será necessário o melhoramento do roteamento da sua frota para atingir essa minimização de custos.

Um correto roteamento das redes de abastecimento traduz-se num maior aproveitamento por parte das organizações dos recursos que tem a seu dispor e, por consequência, essa otimização leva a que o impacto quer ambiental, quer económico seja reduzido.

O problema de roteamento de veículos (VRP) tem tido uma especial atenção por parte da indústria dos transportes devido à necessidade da diminuição de gastos no processo de produção de uma mercadoria, tendo surgido na última década o GVRP em que o objetivo é harmonizar o âmbito financeiro e ambiental. As principais grandes diferenças

entre os mesmos, é que no caso do GVRP, a energia utilizada para a realização do percurso é contabilizada e minimizada levando a valores emissão de CO₂ inferiores (Jemai, Zekri, & Mellouli, 2012).

Nas cidades e fora delas, muitas vezes o ar possui má qualidade e ultrapassa valores seguros para o ser humano devido aos mais variados fatores. A otimização do roteamento das frotas considerando o congestionamento na sua formulação leva a que a emissão de gases poluentes diminua e, por consequência, a qualidade do ar nas nossas cidades se recupere.

1.2 Objetivos

Este documento tem como objetivo principal incorporar o congestionamento num modelo base de roteamento de veículos e avaliar qual o impacto na definição das rotas dos veículos. Pretende-se ainda estabelecer a ligação entre os conhecimentos adquiridos na licenciatura em Engenharia Mecânica Automóvel e os assuntos abordados no Mestrado de Gestão Industrial.

De forma a atingir este objetivo será elaborada uma ferramenta de apoio à decisão tendo por base uma formulação matemática e um modelo de cálculo de emissões. O modelo de cálculo de emissões irá fornecer os valores das emissões, sendo os valores de emissões mais elevados em congestionamento, e através da sua minimização levará a que a formulação matemática tenha poder de decisão e impacto na definição das rotas tendo em conta o congestionamento.

Depois de obtidos os resultados da minimização de emissões será avaliada de que forma os resultados dessa função objetivo têm impacto na definição de rotas.

1.3 Estrutura e Organização

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos, onde o primeiro tem como função a contextualização sobre este trabalho e a enumeração dos objetivos do mesmo. No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica acerca dos temas subjacentes a esta

dissertação, o seu desenvolvimento ao longo dos últimos anos e quais as metodologias adotadas.

No que diz respeito ao terceiro capítulo, é apresentada a formulação proposta assim como as fontes de onde decorreram as metodologias aplicadas. Por fim, são interpretados os resultados provenientes da formulação, juntamente com a ligação que os mesmos têm com o objetivo da dissertação.

Por último, no quarto capítulo são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos, bem como os possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Setor dos transportes
 - 2.1.1 Impacto económico
 - 2.1.2 Impacto Ambiental
- 2.2 Problema de roteamento de veículos
 - 2.2.1 Dynamic VRP
- 2.3 Green Logistics
- 2.4 Green Vehicle Routing Problem
- 2.5 Pollution Routing Problem
 - 2.5.1 Fatores de emissão

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita a revisão bibliográfica de modo a obter o máximo de informação e conhecimento para a elaboração desta dissertação de mestrado. As referências bibliográficas estão apresentadas no Anexo I.

2.1 *Setor dos transportes*

O setor dos transportes assume, atualmente, um papel importante na economia global. Inevitavelmente, todos os setores económicos da atualidade estarão dependentes, de uma forma mais ou menos direta, da funcionalidade e eficiência obtida pelo setor dos transportes.

Deste modo, a análise do impacto que este setor tem sobre a sociedade e economia, tem vindo a crescer de tom na última década, levando a profundas alterações impostas a nível comunitário, de forma a reduzir os impactos negativos do setor dos transportes.

(Grazia Speranza, 2018) define algumas das principais tendências da cadeia de abastecimento como a otimização de toda a rede da cadeia de abastecimento, partilha globalizada da informação para melhorar o seu desempenho e agilidade para adaptação às constantes mudanças das condições do mercado.

2.1.1 *Impacto económico*

O transporte rodoviário continua a ser o meio privilegiado de transporte de passageiros e mercadorias na Europa. Em termos económicos, o transporte rodoviário é o meio principal de transporte de mercadorias e representa a maior parte do volume de tráfego do transporte terrestre no território da União Europeia; na última década tem registado um crescimento contínuo. (Comissão Europeia, 2014)

O setor dos transportes é muito importante para a economia de qualquer país, seja a nível de atividade económica ou a nível de emprego. Este é não só o elo da cadeia de abastecimento, o que o torna num dos grandes motores de uma economia, como também é um impulsionador de emprego e de Produto Interno Bruto (PIB). (Comissão Europeia, 2014)

Na União Europeia (UE28) o transporte de mercadorias é assegurado maioritariamente pelo tráfego rodoviário, o qual possui a maior expressão em volume, 75,1%, seguido do marítimo com um volume de 16,8%. Na Figura 1 é possível perceber qual a taxa de variação entre os anos de 2017 e 2018 no que toca ao volume de mercadorias transportadas.

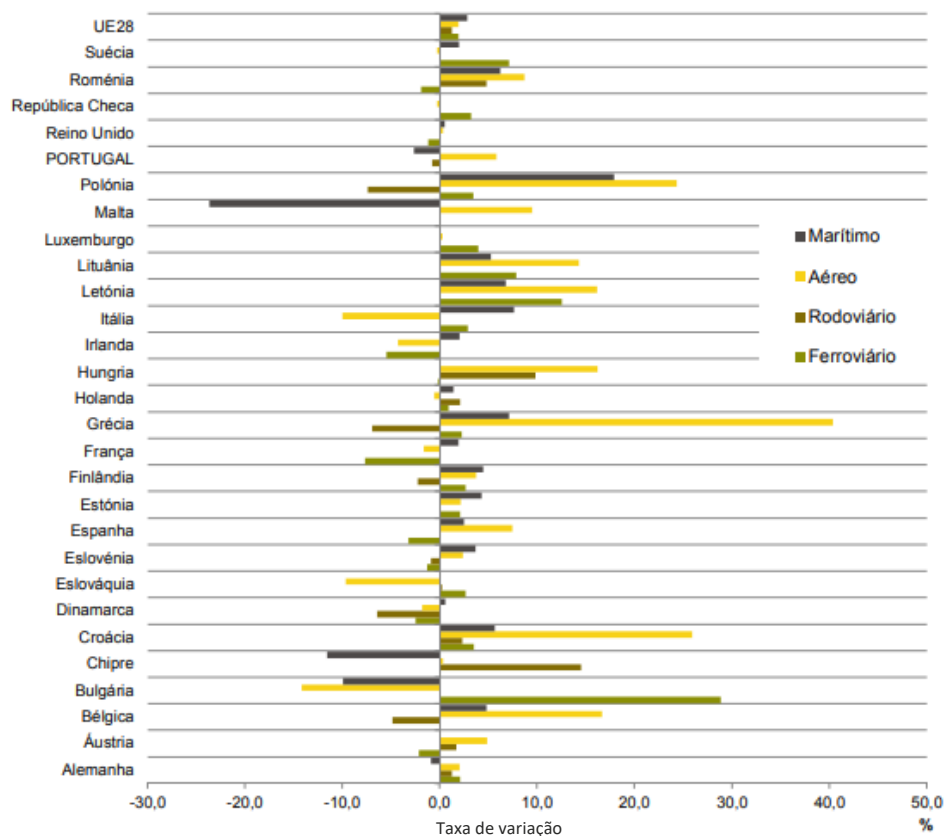


Figura 1- Taxa de variação entre 2017 e 2018 Fonte: (INE, 2018)

No panorama português, o transporte de mercadorias rodoviário mantém a sua predominância face aos outros métodos de transporte, 157,8 milhões de toneladas de

CO₂ em comparação aos 84,0 milhões de toneladas de CO₂ emitidos pelo transporte marítimo de mercadorias. (INE, 2018)

Tendo em conta os dados analisados é perceptível a elevada importância a nível económico que o setor dos transportes tem sobre o mundo em que vivemos e, por isso, o estudo da sua otimização é sem dúvida importante não só para as entidades empregadoras, mas também para o país em que se inserem.

2.1.2 Impacto ambiental

Tal como é de conhecimento geral, o dióxido de carbono (CO₂) é o maior responsável pelo efeito de estufa nas últimas décadas. Desde que foi medido pela primeira vez em 1958, a concentração de CO₂ na atmosfera terrestre tem vindo a aumentar continuamente (Trenberth & Fasullo, 2013). Assim sendo, a redução de emissões dos transportes pesados, embora não em tão grande escala como outros setores, tem se tornado um fator preponderante no objetivo mundial de diminuição de emissões de CO₂. (Comissão Europeia, 2014)

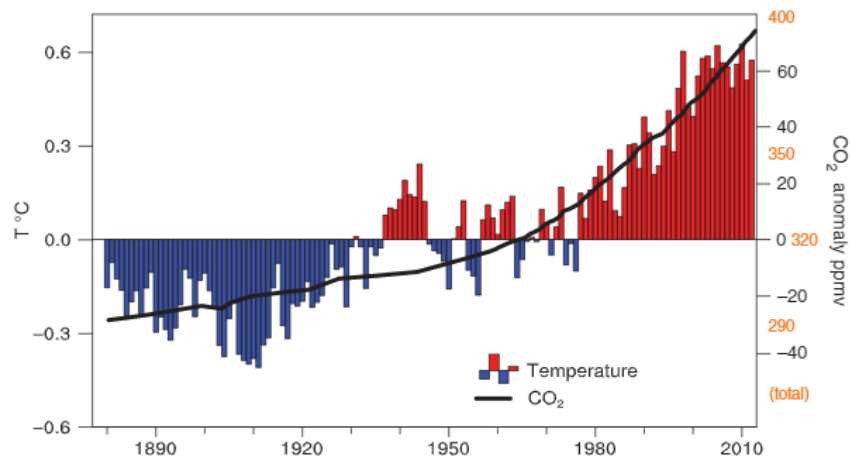


Figura 2 –Evolução de teor de CO₂ Fonte: [AGU](#)

Na Figura 2, é possível perceber o crescente valor de CO₂ nas últimas décadas e como esse aumento está diretamente relacionado com o aumento da temperatura média.

A mudança para a mobilidade com baixas emissões no setor dos transportes é inevitável. Até meados do século XXI as emissões devem ser pelo menos 60% menores do que em 1990 e estar estoicamente a caminho do zero. (Comissão Europeia, 2018)

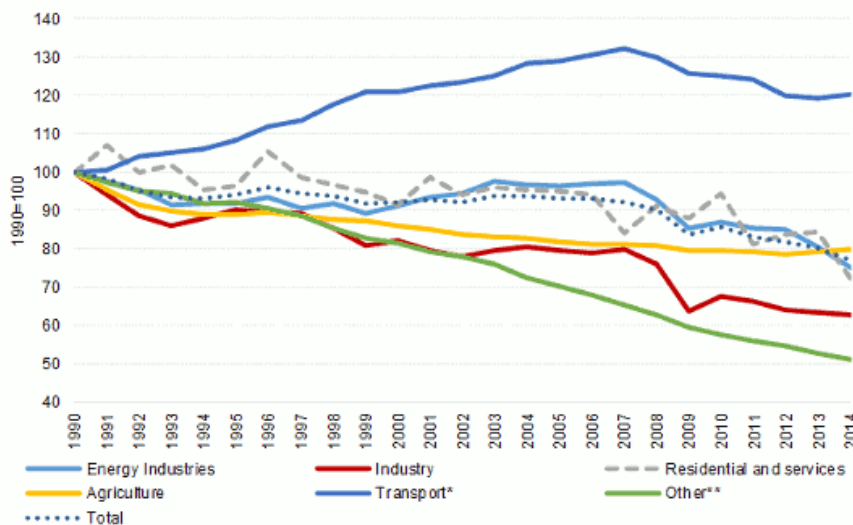


Figura 3- Evolução de emissões de CO₂ nos principais setores Fonte: [EEA](#)

Na Europa, o setor de transporte rodoviário está a aproximar-se lentamente em direção a uma economia verde em termos de aumento da eficiência energética, assim como na redução do consumo de energia e de emissões como se pode observar na Figura 3. (Abreu, 2018)

2.2 Problema de roteamento de veículos

O problema de roteamento de veículos (VRP) consiste em servir um número de clientes usando uma frota de veículos que pode ser homogénea ou heterogénea, possuindo, por isso, todos a mesma capacidade ou capacidades distintas para cada tipologia de veículo. Tipicamente, o objetivo do VRP é minimizar os custos da operação sendo a distância percorrida a fórmula de cálculo dos custos associados as rotas definidas. Os VRP podem ser facilmente complicados com a implementação de janelas temporais de entrega nos clientes, prazos de entrega ou restrições mais complexas como *Pickup and Delivery* (PDP).

O estudo do VRP foi primeiramente desenvolvido por (Dantzig & Ramser, 1959) onde o objetivo era minimizar a distância percorrida por uma frota de veículos de entrega de gasolina. A literatura sobre VRP tem nestes últimos 60 anos com o incremento de novos métodos, modelos matemáticos mais práticos e algoritmos com performance mais alta. Devido à sua elevada importância no dia a dia das organizações e ao aumento de complexidade das restrições que são impostas, a preocupação com o desenvolvimento e aprimoramento do VRP continua a crescer, assim como um crescente esforço não só por parte das organizações, mas também por parte dos governos.

Ao longo dos anos têm surgido diversas abordagens ao tema, de forma a colmatar as necessidades, limitações dos fornecedores ou consumidores surgindo novas formas de solucionar o problema dependendo de quais são as limitações das partes envolvidas ou do meio que as rodeia.

2.2.1 *Dynamic VRP*

O *dynamic VRP* inicialmente abordado no final dos anos 70 pretendia seguir a tendência de que a informação da quantidade a transportar a cada cliente e localização dos veículos devia ser transmitida em tempo real, alocando o veículo ideal para essa viagem. Os avanços tecnológicos atingidos nas últimas décadas levaram a que surgisse o interesse de estudar a implementação do *dynamic VRP* nas mais diversas áreas. Ao longo dos anos foram implementadas aos poucos as tecnologias que iam surgindo, elevando o roteamento de veículo tradicional ao roteamento de veículos em tempo real, passando a ser possível responder aos pedidos dos clientes com a máxima prontidão possível. (Psaraftis, 1980) introduziu o conceito de *immediate request*, em que o cliente ao efetuar um pedido pretende ser servido o mais rápido possível, sendo necessário o replaneamento das rotas com a maior prontidão. Mais tarde, com o aparecimento do GPS, o desenvolvimento dos *smart phones* e a sua vulgarização combinada com a precisão do *Geographic Information System (GISs)*, as empresas são agora capazes de monitorizar e gerir as suas frotas em tempo real. A fonte de dinamismo mais comum no roteamento de veículos provém de pedidos *online* (Pillac, Gendreau, Guéret, & Medaglia, 2013).

O serviço prestado pode ser a entrega de bens estudado por (Mes, 2007), (Goel, 2008), (Hvattum, 2006) ou a prestação de serviços abordados por (Thomas, 2007), (Beaudry, 2010). De forma a tornar esta variante mais exequível, vários estudos foram efetuados de forma a incorporar o tempo de viagem nas variantes do problema (Tagmouti, 2011), (Lorini, 2011). Na Figura 4 é possível perceber o impacto do *dynamic VRP* numa rota já definida.

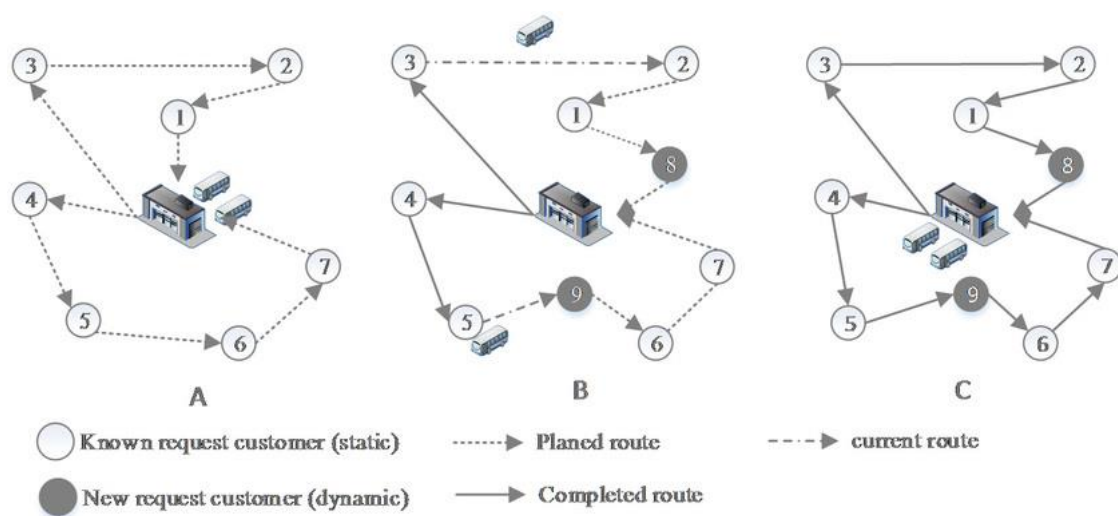


Figura 4- *Dynamic VRP* Fonte: (Chen, 2017)

2.2.2 *Capacitated VRP*

Na vasta gama de variantes do VRP, o *Capacitated VRP* (CVRP) para além de ser umas das primeiras evoluções do VRP convencional definido por (Dantzig & Ramser, 1959) em que o modelo tem como dados de entrada a localização de um armazém e os clientes assim como uma matriz distância entre cada par de vértices e a procura de cada um dos clientes, a capacidade do veículo é também tida em conta. A solução esperada é um conjunto de rotas, que começam e acabam no armazém que visitam cada cliente uma única vez satisfazendo as suas necessidades não excedendo a capacidade do veículo em cada rota. Sendo a variante mais simples, é uma das principais bases para desenvolvimento de novas ideias e formulações.

2.2.3 *Split-Delivery VRP*

Como já referido anteriormente, o VRP é caracterizado por se assumir que cada cliente é visitado por um veículo exatamente uma vez, no entanto, este pressuposto nem sempre é realista pois é comum acontecer que a necessidade do cliente é superior à capacidade dos veículos disponíveis na frota. Na formulação do *Split-delivery VRP* (SDVRP) a restrição referida é relaxada de forma a permitir que cada cliente seja visitado por mais do que um veículo. Primeiramente introduzido por (Dror & Trudeau, 1989) demonstrou grandes capacidades de diminuição de custos e distância total percorrida devido ao número de veículos utilizados ser inferior. O estudo efetuado por (C. Archetti, Speranza, & Hertz, 2006) evidenciou que os ganhos podem chegar aos 50% dividindo as entregas dos clientes.

2.2.4 *Fuzzy VRP*

No mundo real, nem sempre as necessidades dos clientes correspondem a um número certo, ou as janelas temporais são imperativas, assim sendo, expressões como “10:00 as 12:00 é a hora ideal de descarga” ou “são necessários entre 150 e 200 itens” são tratadas através da *fuzzy logic* de forma a proceder as formulações de elementos vagos, incertos ou subjetivos. Neste tipo de formulação, são usados algoritmos genéricos de forma a encontrar a máxima satisfação média, enquadrando as quantidades transportadas com as necessidades dos clientes, assim como ajustar os horários de entrega dentro das janelas temporais de descarga sem deixar de cumprir os objetivos do VRP tradicional. Em (Tang, Sanville, & Henkelman, 2009) são desenvolvidas funções para as janelas temporais “*fuzzy soft windows*” formulando um modelo multi objetivo, maximizando o nível de satisfação dos clientes e minimizando o custo das rotas. Assim como as janelas temporais, também a procura tem tido a sua atenção pois é algo comum no mundo real a incerteza nas quantidades necessárias e, portanto, a existência dessa flexibilidade permite em alguns casos existir um maior aproveitamento de cargas, podendo com pequenos ajustes as quantidades a levar a cada cliente corresponder ao aproveitamento total da carga evitando assim uma viagem a um só cliente.

2.2.5 *Open VRP*

O Open VRP (OVRP), assim como nas restantes formulações de VRP complexos, analisa rotas eficientes minimizando custo total numa dada frota de veículos, visitando cada cliente uma única vez por um veículo. Restrições referentes a frota de veículos como a capacidade dos mesmos, duração de viagens e durações temporais são também tidas em consideração. O OVRP difere dos já conhecidos problemas de roteamento de veículos na medida em que o retorno de cada veículo ao armazém não é obrigatória, assim sendo o veículo parte do armazém, visita um determinado número de clientes e a sua viagem termina num deles, podendo retornar ao armazém se visitar os mesmo cliente em ordem inversa, esta formulação aplica-se facilmente ao mundo realmente se pensarmos na entrega porta a porta de produtos variados ou jornais (Cao & Lai, 2010).

Esta formulação tem recebido pouca atenção comparativamente às restantes variantes, no entanto, recentemente tem vindo progressivamente a receber atenção dos investigadores devido a sua aplicabilidade a diversas áreas da logística moderna como demonstrado em (Tarantilis, 2002) onde é formulado um OVRP aplicado a um problema do mundo real, a distribuição de carne na cidade de Atenas, na Grécia.

2.3 *Green Logistics*

O aumento do aquecimento global e a mudança da biodiversidade do planeta levou a que a sustentabilidade do planeta esteja em perigo iminente. Nos últimos anos tem se observado uma crescente preocupação nas mais diferentes áreas levando à proposta de pontos de melhoria, de forma a manter a sustentabilidade ambiental.

É frequentemente afirmado que comportamentos por parte da indústria não planeados e irresponsáveis são potenciais ameaças à sustentabilidade (King & Lenox, 2000). Assim sendo, um dos principais objetivos das organizações é estabelecer indústrias sustentáveis, para isso, as mesmas necessitam de fazer mudanças e perceber quais os pontos críticos da sua atividade para colmatar eficazmente os fatores que mais prejudicam a sustentabilidade de cada organização, o que é frequentemente

referenciado como missão “going green” (Bansal & Roth, 2000). Uma logística sustentável assenta sobre três pilares principais, Sociedade, Economia e Ambiente.

2.4 Pollution Routing Problem

Apresentado por (Bektaş & Laporte, 2011) o *Pollution Routing Problem* (PRP) tem por base um VRP com janelas temporais (VRPTW) adicionando à função objetivo três variáveis, combustível, emissões e custos com os condutores. No PRP a carga do veículo e a velocidade em cada secção de estrada são consideradas variáveis de decisão. O objetivo tradicional de minimização de distância percorrida não implica necessariamente a diminuição de custo de combustível ou custo com os condutores que são os custos predominantes nos custos totais (Bektaş & Laporte, 2011). Assim como minimizar a carga por si só, não traduz minimização de uso de energia, principalmente, quando há restrição de janelas temporais (Bektaş & Laporte, 2011). Mais tarde, (Franceschetti, 2013) introduz o *Pollution Routing Problem* dependente do tempo (TDPRP) em que adapta o PRP a ter em conta o congestionamento de trânsito dividindo-o em dois períodos, o período inicial do congestionamento com velocidade baixa e constante, e um segundo período com uma gama de velocidade pré-definida em que o tempo de viagem depende linearmente da hora de partida. É descrita uma formulação com base numa programação linear inteira onde as velocidades dos veículos são otimizadas entre um conjunto de valores discretos.



Figura 5- Exemplo de rota minimizando o uso de energia Fonte: Bektaş 2011

2.5 *Green Vehicle Routing Problem*

Nas últimas décadas o GVRP (Demir, Bektaş, & Laporte, 2014) que se caracteriza por ter como objetivo o equilíbrio entre os custos operacionais e o impacto ambiental, tem recebido atenção por parte dos investigadores e empresas. É de fácil percepção que o congestionamento influencia negativamente o consumo de combustível. Por isso, (Ericsson, 2006) propôs um modelo para estimar qual o impacto de otimização de rotas através de um sistema de GPS específico no consumo de combustível. Por sua vez, (Kara, 2007) elaborou uma função de custo em que é tido em conta qual o valor da carga do veículo relacionando-a com o consumo de combustível. Não só o ambiente externo como o tráfego e a carga do veículo influencia o consumo de combustível e o estilo de condução de cada condutor tem um papel muito importante. Desta forma, (Van Der Voort, 2001) desenvolveu uma ferramenta que advertia o condutor para a troca de mudança do veículo e quando acelerar ou deixar de o fazer tendo em conta as condições da estrada e trânsito. Estudos mais recentes recaem sobre o impacto do congestionamento nas emissões com tempos de viagem dependentes da hora do dia e velocidade (Figliozzi, 2010). Em (Wen, Çatay, & Eglese, 2014), foi desenvolvido um VRP em que o custo total consiste em custo com combustível, custo com condutores e taxa de congestionamento. O custo com combustível é influenciado pela velocidade do veículo e a taxa de congestionamento é aplicada sempre que um veículo entra numa zona de congestionamento durante a sua rota. Na Figura 6 é apresentado o modelo de (Ericsson, 2001) em que demonstra quais os fatores que influenciam direta e indiretamente os consumos de combustível e, por consequência, as emissões.

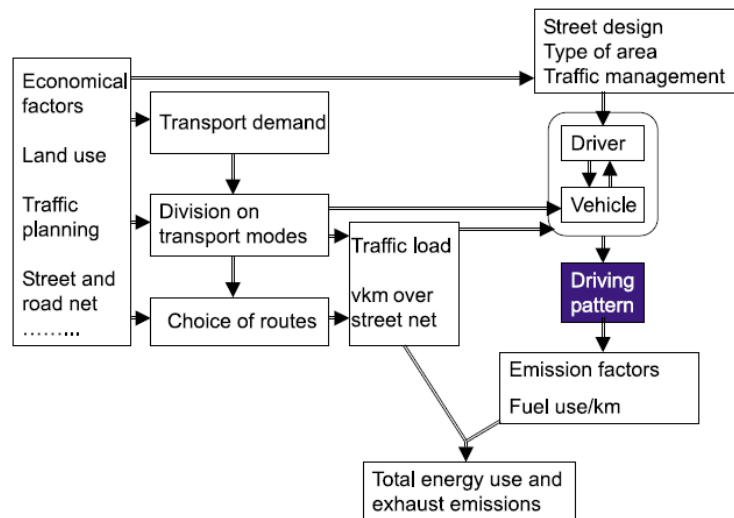


Figura 6- Modelo dos fatores que influenciam as emissões dos veículos Fonte: (Ericsson, 2001)

2.5.1 Fatores de emissão

Existem diversos fatores que podem influenciar o consumo de combustível de um veículo, entre os quais se destacam os seguintes:

1. **Peso do Veículo:** um veículo ao estar sujeito a uma maior carga ou até mesmo sendo ele próprio mais pesado acaba por necessitar de mais energia para se movimentar, e por consequência, os consumos de combustível tendem naturalmente a aumentar. (Boriboonsomsin, Vu, & Barth, 2010)
2. **Velocidade e aceleração :** o consumo de combustível e rácio de CO₂ por milha percorrida diminui à medida que a velocidade do veículo pesado aumenta até aproximadamente entre 30mph e as 35mph e a partir daí volta a aumentar (Nicolai & Hine, 2015). Para além disso, as emissões de CO₂ duplicam quando a velocidade do veículo diminui das 30mph para as 12.5mph, o mesmo acontece quando a velocidade passa das 12.5mph para 5mph (Bickel, 2006).

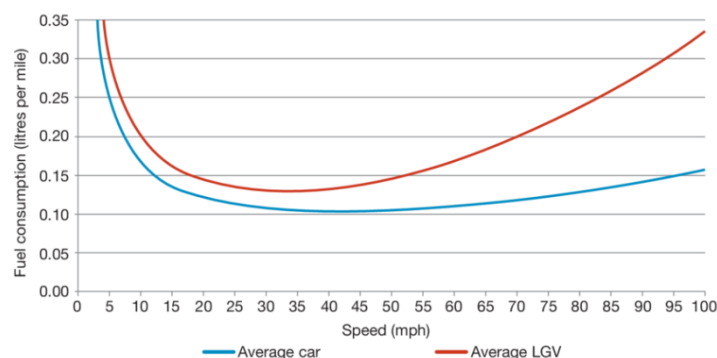


Figura 7- Consumo de combustível em função da velocidade Fonte: (Nicolai, 2015)

3. **Condição atmosféricas:** as condições atmosféricas afetam os consumos de combustível, direta e indiretamente. Por exemplo, ventos frontais prejudicam os consumos de combustível pois, o veículo necessita de mais potência do motor de forma a neutralizar o arrasto provocado pelo vento. Por outro lado, o tempo quente leva a que os condutores usem o ar condicionado o que provoca uma sobrecarga no motor levando a um aumento do consumo de combustível. (Boriboonsomsin et al., 2010)
4. **Congestionamento:** à medida que o congestionamento aumenta, também as emissões de CO₂ aumentam, ou seja, existe uma elevada sensibilidade ao tipo de condução que é praticado. Conduzir a uma velocidade baixa constante traduz-se em menos emissões de CO₂ comparativamente ao pára-arranca. (Jemai et al., 2012)

Em suma, é de salientar que as condições de trânsito, as rotas usadas e a carga do veículo são os principais fatores que influenciam a eficiência no que toca as emissões de CO₂. Sendo o principal objetivo deste trabalho o estudo do congestionamento na logística urbana, será desenvolvido um G-VRP que tenha em conta não só o congestionamento, mas também que incorpore os fatores de emissão referidos anteriormente, de modo a ir ao encontro das necessidades sentidas atualmente pelas organizações.

2.5.2 Técnicas de estimativa de emissão

De forma a determinar o impacto ambiental do roteamento de veículos é necessário medir os impactos ambientais da emissão de CO₂. As emissões são normalmente estimadas com base em quantidades médias emitidas por quilómetro. No entanto, é de fácil perceção que a quantidade de carga transportada é um parâmetro muito importante que tem de ser tido em conta. Todavia, existem outros métodos de estimar as emissões de CO₂ de um veículo sendo os mais comuns o método baseado na distância percorrida e a abordagem baseada no combustível.

Método baseado na distância: Neste método as emissões podem ser calculadas usando o fator de emissão baseado na distância. Este método pode ser usado quando a

atividade do veículo não pode ser analisada com base nos dados de economia de combustível e então é calculado com base na distância percorrida. Sendo por isso necessário recolher os dados referentes à distância percorrida, tipo de veículo e combustível que o mesmo usa, de seguida é necessário multiplicar a distância percorrida pelo fator de emissão. De forma a obter o fator de emissão é necessário conhecer o fator de conversão do combustível (2,61 kg.co2/litro de diesel) e de seguida é necessário encontrar uma função que tenha em conta os dados relacionados com consumos médios e carga do veículo. Resultando a seguinte equação (1).

$$co2_{emission} = traveled_{distance} * emission_{factor} \quad (1)$$

Abordagem baseada no combustível: Nesta abordagem a quantidade de combustível consumida é multiplicada pelo fator de emissão de CO₂ de cada combustível. O fator de emissão é desenvolvido com base no teor de calor no combustível, na fração de carbono no combustível que é oxidado e o coeficiente do teor de carbono. (Jemai et al., 2012) Na maioria dos casos são usados fatores de emissão padrão baseados nos tipos de combustível genéricos. Para a sua concretização é necessário reunir dados de consumo de combustível por tipo de combustível. Quando o consumo de combustível não é conhecido há formas de calcular quantidades aproximadas tendo em conta a distância percorrida e um fator de eficiência. Quando são conhecidos os dados de consumo de combustível resulta então a a equação (2) em que é feita a multiplicação dos valores referidos.

$$co2_{emissions} = fuel_{used} * heating_{value} * emission_{factor} \quad (2)$$

DESENVOLVIMENTO

- 3.1. Descrição do Problema
- 3.2. Pressupostos da formulação
 - 3.2.1 Pressupostos dos veículos
 - 3.2.2 Pressupostos dos clientes
 - 3.2.3 Pressupostos dos períodos de tempo
- 3.3. Cálculo do fator de emissões

3 DESENVOLVIMENTO

No terceiro capítulo será apresentada a formulação adotada, assim como a otimização da função objetivo, de forma a potenciar a diminuição de emissões de CO₂. O problema será resolvido com base numa formulação matemática e, por fim, a respetiva otimização da função objetivo. Os dados serão comparados de forma sucinta, de forma aos resultados obtidos serem de fácil perceção.

3.1 Descrição do Problema

A formulação proposta considera o roteamento de veículos dependente do tempo com a implementação de janelas temporais na atribuição de rotas aos veículos. O atraso foi considerado na função objetivo, assim como uma penalização, algo que nem sempre é tido em conta na formulação de GVRP. Assim sendo, será referido como *Green Vehicle Routing and Scheduling Problem* (GVRSP). De forma a implementar esta formulação foram definidas velocidades constantes para cada um dos cinco períodos de tempo. Os períodos de tempo foram divididos tendo em conta os picos de trânsito que existem de manhã e ao final da tarde, e os períodos de tempos que os antecedem e sucedem. De forma a completar a flexibilidade do problema em se adaptar as situações do mundo real foi também considerada uma frota de veículos com 5 tipos de veículos com capacidades de carga, autonomia e emissões conhecidas.

A formulação do GVRSP proposta é linear e pode ser resolvida e encontrada a solução ótima pela maioria dos MIP *solvers* para problemas de pequena dimensão. O *software* utilizado foi o IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* versão 12.10.0.

3.2 Pressupostos da formulação

O GVRSP proposto parte da mesma base de funcionamento de qualquer VRP, uma dada frota de veículos que neste caso é heterogénea vai ser alocada conforme as necessidades. Essa frota de veículos tem de visitar todos os n clientes uma só vez por um só veículo e a sua localização é do tipo agrupada como é possível observar na Figura 8.

3.2.1 Pressupostos dos veículos

É definido H como sendo o conjunto de veículos e q número de veículos disponíveis na frota H . Cada veículo h , dependendo do seu tipo, tem uma capacidade máxima C_h e uma autonomia máxima L_h . As capacidades máximas e autonomias máximas de cada tipo de veículos serão determinadas com base nos dados obtidos das *benchmarks de Solomons* em que a capacidade assumida dos veículos é de 200 e, portanto, as capacidades e autonomias foram obtidas a partir de proporcionalidade com os dados de viaturas reais como se pode observar na Tabela 1, os dados reais foram obtidos do site da *Mercedes-Benz* Portugal. A autonomia considerada no problema teve em conta a gama de valores das distâncias entre os diversos clientes aproximando-se a uma divisão por dez do que acontece num problema com dados obtidos do mundo real e, por isso, também a autonomia considerada seguiu esse padrão.

Tabela 1- Capacidade de carga e autonomia da frota

Tipo	Capacidade Real (Kg)	Capacidade Problema	Autonomia Real (Km)	Autonomia Problema
ID1	735	148	1090	109
ID2	864	174	945	95
ID3	994	200	1000	100
ID4	1475	297	691	70
ID 5	2440	490	619	62

3.2.2 Pressupostos dos clientes

O conjunto de nós é definido como $N = \{0, 1, \dots, n\}$ em que n representa o número de clientes e nó 0 representa o armazém. O conjunto de arcos que podem ser percorridos é representado por $A = \{(i, j): i \neq j, i, j \in N\}$ com uma determinada distância D_{ij} associada. A conjunto dos clientes representa-se por $N' = N \setminus \{0\}$. Cada cliente i tem uma procura R_i associada que requer um serviço de tempo g_i dentro da janela temporal $[0, E_i]$ em que E_i é o prazo previsto para a entrega do cliente i , assim sendo um atraso resulta numa penalização w_i , por cada unidade de tempo desrespeitada. Serão utilizados dados agrupados como demonstrado na Figura 8 retirados da *benchmark* de Solomons C101. Devido a limitações de processamento de dados do programa, a base de dados utilizada estará limitada a dez clientes.



Figura 8- Dados agrupados

Na Figura 8 é apresentada a base de dados dos clientes utilizada com a maioria dos dados retirada das *benchmarks* de Solomons. Devido a inexistência do valor w_i referente às penalizações por atraso, os mesmos foram gerados aleatoriamente com valores entre 1-10. No que diz respeito ao R_i , procura de cada cliente, os valores apresentados não foram os que se encontram em C101, isto porque os valores eram bastante inferiores e, por isso, um veículo satisfazia com facilidade os 10 clientes e, por conseguinte, os dados apresentados foram também gerados aleatoriamente entre 30-100.

Tabela 2- Dados dos clientes

Nó	X_i	Y_i	E_i	w_i	R_i	g_i
0	40	50	1200	0	0	0
1	45	68	967	3	39	90
2	45	70	870	10	70	90
3	42	66	146	6	66	90
4	42	68	782	1	34	90
5	42	65	67	8	33	90
6	40	69	702	8	45	90
7	40	66	225	6	50	90
8	38	68	324	10	76	90
9	38	70	605	4	33	90
10	35	66	410	6	98	90

A matriz distância resultante destes dados dos clientes e o excerto da *benchmark* de Solomons C101 são apresentadas respetivamente nos Anexo II e Anexo III.

3.2.3 Pressupostos dos períodos de tempo

O horizonte temporal é dividido arbitrariamente em m períodos de tempo, e cada período de tempo $k \in K$ é definido pelo seu início b_k e fim e_k . A velocidade dos veículos no arco (i, j) no período de tempo k representa-se por v_{ijk} , não variado entre tipos de veículos, tendo sido arbitrada da mesma forma como foi definida a autonomia dos veículos referido anteriormente, uma divisão por 10 pelas velocidades esperadas nesse período de tempo. Na Tabela 3 são expostos os pressupostos assumidos no que diz respeito aos períodos de tempo.

Tabela 3- Pressupostos dos períodos de tempo

Período temporal	Horário real (horas)	Horário no problema (unid. Tempo)	b_k (unid. Tempo)	e_k (unid. Tempo)	v_{ijk}
Período 1	4h-7h	0-179	0	179	9
Período 2	7h-10h	180-359	180	359	5
Período 3	10h-17h	360-779	360	779	9
Período 4	17h-20h	780-959	780	959	5
Período 5	20h-24h	960-1200	960	1200	9

3.3 Cálculo do fator de emissões

O consumo de combustível é influenciado por diversos fatores, como a distância percorrida, velocidade média, aceleração, carga, tipo de motor e seu tamanho, inclinações da estrada e efeitos climáticos como por exemplo a temperatura. Tendo em conta que as emissões de CO₂ são diretamente proporcionais à quantidade de combustível consumido, foi usado um rácio de combustível utilizado para ter em conta as emissões de CO₂ emitidas em determinada rota. O consumo de combustível pode ser estimado usando dados reais obtidos a partir do veículo ou, em alternativa pode ser utilizado um modelo de aproximação ao consumo de um determinado veículo com determinadas características.

Nesta formulação será usado o modelo *comprehensive emissions model* de (Barth, 2004) e (Barth & Boriboonsomsin, 2008) através da abordagem do modelo de emissões usado

por (Bektaş & Laporte, 2011) e simplificado de forma a ser mais intuitiva à sua utilização por (Franceschetti et al., 2013). Este modelo pode ser dividido em três módulos, módulo do motor, módulo da velocidade e módulo do peso. Os dados necessários para o cálculo são apresentados na

Tabela 4, sendo que os dados usados basearam-se nos usados por (Franceschetti et al., 2013) à exceção dos dados relativos às dimensões, tara e capacidade do motor dos veículos tendo sido os mesmos obtidos a partir do configurador oficial da *Mercedes-Benz* Portugal de forma a adaptar os dados à logística urbana, utilizando veículos que comumente observamos a circular em zonas urbanas.

Tabela 4- Dados do modelo de emissões

Notação	Descrição	Valor
ε	Rácio Ar/Combustível	1
κ	Valor do calor de combustível diesel típico (kJ/g)	44
ψ	Fator de conversão (g/l)	737
k	Fator de fricção do motor (kJ/rev/l)	0.2
N_e	Velocidade do motor (rev/s)	33
V	Capacidade máxima do motor (l) ID1/ ID2/ ID3/ID4/ID5	1.46/1.75/1,95/2.99/2.99
ρ	Densidade do ar (kg/m ³)	1.2041
A	Área frontal do veículo (m ²) ID1/ ID2/ ID3/ID4/ID5	2,936/3,625/3,625/4,522/4,522
μ	Tara do veículo (kg) ID1/ ID2/ ID3/ID4/ID5	1381/1919/2091/2560/2560
g	Constante gravitacional (m/s ²)	9.81
\varnothing	Angulo de inclinação da estrada	0
C_d	Coeficiente aerodinâmico	0.7
C_r	Coeficiente de resistência rolamento	0.01
ε	Eficiência de transmissão	0.4
ω	Eficiência de motores diesel	0.9

O rácio de consumo de combustível instantâneo, identificado por FR (l/s) pode ser estimado através da equação (3).

$$FR = \frac{\Sigma}{\kappa\psi} \left(\kappa N_e V + \frac{0.5 C_d \rho A v^3 + (\mu + f)v(g \sin \varnothing + g C_r \cos \varnothing)}{1000 \varepsilon \omega} \right) \quad (3)$$

Sendo $\lambda = \Sigma/\kappa\psi$, $\gamma = 1/1000\varepsilon\omega$, $\beta = 0,5C_dA\rho$, $\alpha = g\sin \varnothing + gC_r\cos \varnothing$ a equação (3) pode ser simplificada resultando na equação (4).

$$FR = \lambda(\kappa N_e V + \gamma(\beta v_k^3 + \alpha(\mu + f)v)) \quad (4)$$

A quantidade total de combustível usado, denominado por F (l), para percorrer uma distância d (m) a uma velocidade constante v (m/s) e com uma carga f (kg) é igual ao rácio de combustível multiplicado pelo tempo de viagem obtido através de d/v resultando na equação (5).

$$F = \lambda \left(\kappa N_e V \frac{d}{v_k} + \gamma \beta d v_k^2 + \gamma \alpha (\mu + f) d \right) \quad (5)$$

Na equação (5) é possível observar o somatório dos três módulos, correspondendo o primeiro módulo ao módulo do motor, o segundo da velocidade e o terceiro diz respeito ao módulo de carga.

Na Figura 9 é demonstrado como cada modulo evolui com o aumento da velocidade, assim como qual o comportamento do resultado da equação (5) com a variação da mesma.

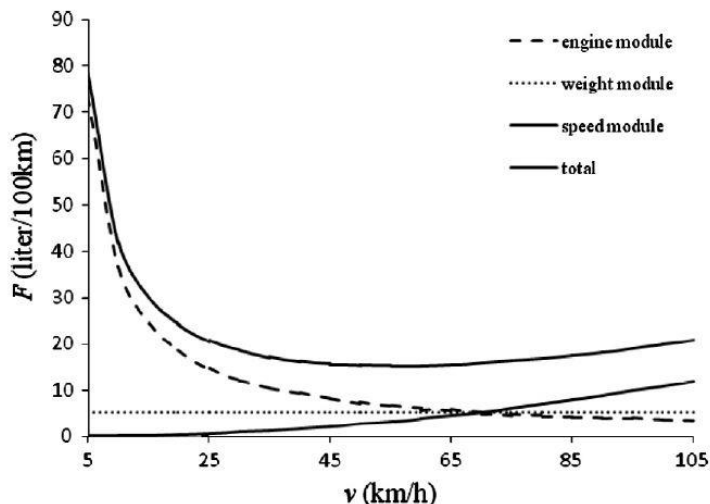


Figura 9- Consumo de combustível dependente dos 3 módulos

Tendo em conta que alguns dados usados no cálculo do consumo de combustível são meramente utilizados na forma de dados experimentais, como por exemplo as distâncias entre clientes e as velocidades dos veículos, os consumos não correspondem a números reais sendo, por isso, utilizados como forma de proporcionalidade entre os cinco tipos de veículos considerando. Na

Tabela 5 é possível perceber a variação das emissões por unidade de distância entre cada ID de veículo e período de tempo k.

Desta forma é incorporado o congestionamento no modelo, pois, nos períodos de tempo em que existe o congestionamento e, por consequência, as velocidades assumidas são inferiores os valores de emissões de CO₂ são superiores. Posto isto, com a minimização da função objetivo e, por consequência, minimização das emissões de CO₂ estando as mesmas diretamente relacionadas com o congestionamento sentido nas rotas definidas podendo ser avaliado o impacto do congestionamento na definição das rotas.

Tabela 5- Consumo de combustível por unidade de distância

		<i>ID</i>				
		1	2	3	4	5
<i>k</i>	1	1,771	2,870	3,585	6,496	10,648
	2	1,818	2,926	3,648	6,593	10,745
	3	1,771	2,870	3,585	6,496	10,648
	4	1,818	2,926	3,648	6,593	10,745
	5	1,771	2,870	3,585	6,496	10,648

3.4 Formulação do problema

A formulação adotada para dar resposta ao objetivo proposto foi a desenvolvida por (Xiao & Konak, 2015) devido à sua complexidade e à vasta gama de variáveis tidas em conta levou a que as soluções se aproximassem o mais possível do que é observado num ambiente real. Para além da sua complexidade, possuía as variáveis necessárias à implementação do modelo de emissões de forma a ter em conta o congestionamento.

O GVRSP é composto por uma frota de veículos heterogéneos que visitam n clientes localizados aleatoriamente numa determinada região, começando e terminando cada rota no armazém. Sendo H o conjunto de veículos e q o número de veículos pertencentes à frota H . Cada veículo h tem uma determinada capacidade C_h e uma autonomia máxima L_h dependendo do tipo de veículo. O problema é definido numa rede completa $G(N, A)$ onde $N = \{0, 1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós, e $A = \{(i, j) : i \neq j, i, j \in N\}$ é o conjunto de arcos. O nó 0 corresponde ao armazém, então, $N' = N \setminus \{0\}$ é o conjunto de clientes. Cada arco (i, j) representa o percurso entre o cliente i e j , sendo a distância entre eles representada por D_{ij} . A cada cliente i corresponde uma procura R_i e requer um tempo de serviço g_i e deve ser servido dentro do período de tempo $[0, E_i]$ em que E_i é o prazo máximo de entrega ao cliente i , caso o prazo não seja cumprido uma penalidade de atraso será aplicada w_i , por unidade de tempo. O horizonte temporal é dividido arbitrariamente em m períodos de tempo sendo que as velocidades do tráfico são assumidas constantes em cada período de tempo, mas diferentes entre períodos de tempo. Se definirmos K como a representação do conjunto de períodos de tempo, e cada período de tempo $k \in K$ sendo cada período identificado pelo seu horário de início b_k e de fim e_k . A velocidade no período de tempo k (v_{ijk}) é também assumida como conhecida. As emissões de CO₂ do veículo h quando viaja o arco (i, j) no período de tempo k (c_{ijkh}) são calculados previamente usando o modelo CMEM (Franceschetti et al., 2013) como apresentado no capítulo 3.3.

O problema envolve quatro decisões a ser tomadas para cada veículo descritas de seguida:

- Se o veículo h é usado ou não;
- Se o veículo h é usado quais os arcos (i, j) a ser percorridos;

- O horário de partida e chegada para cada nó numa determinada rota;
- A distância a ser percorrida em cada arco em cada período de tempo.

O objetivo do problema é minimizar a quantidade total de emissões de CO₂ e, ao mesmo tempo as penalizações por atrasos. A principal diferença da formulação presente e a tradicional TD-VRP é que esta permite tempos de espera em qualquer cliente durante a rota de forma a evitar os períodos de congestionamentos. As variáveis decisão do modelo são apresentadas e descritas de seguida:

X_{ij}	Variável binária indica se o arco (i, j) é viajado ($X_{ij} = 1$) ou não ($X_{ij} = 0$)
y_{ijh}	Variável binária indica se o arco (i, j) é viajado pelo veículo h ($y_{ijh} = 1$) ou não ($y_{ijh} = 0$)
x_{ijkh}	Variável binária indica se o arco (i, j) é viajado pelo veículo h no período de tempo k ($x_{ijkh} = 1$) ou não ($x_{ijkh} = 0$)
d_{ijkh}	Variável contínua que indica a distância do arco (i, j) no período de tempo k pelo veículo h
t_{ijkh}	Variável contínua que indica o tempo de viagem do arco (i, j) no veículo h no período de tempo k
l_i	Variável contínua que decide qual o horário de partida do nó i (o horário de partida mínimo é o correspondente a $i = 0$)
a_i	Variável contínua que indica qual o horário de chegada ao nó i (o horário de chegada mais tardio corresponde a $i = 0$)
O_i	Variável contínua correspondente ao atraso no nó i

Assim sendo, é evidenciada a formulação apresentada em (Xiao & Konak, 2015). Foi feita uma correção na equação 18, pois a mesma corresponde à limitação da distância a ser percorrida por um veículo sendo essa limitação efetuada pela autonomia do veículo, no entanto na formulação essa limitação estava erradamente a ser limitada pelo atraso do veículo h , variável O_h tendo sido atualizada para a variável L_h , correspondente à autonomia do veículo h .

$$\text{Minimize } F = \sum_{h=1}^q \sum_{i=0}^n \sum_{j=0:i \neq j}^n \sum_{k=1}^m d_{ijkh} \times e_{ijkh} + \sum_{i=0}^n \omega_i \times O_i$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N' \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N' \quad (7)$$

$$X_{ij} = \sum_{h=1}^q y_{ijh} \quad \forall (i,j) \in A \quad (8)$$

$$y_{ijh} \geq x_{ijkh} \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, h \in H \quad (9)$$

$$y_{ijh} \leq \sum_{k=1}^m x_{ijkh} \quad \forall (i,j) \in A, h \in H \quad (10)$$

$$\sum_{i=0:i \neq j}^n y_{ijh} = \sum_{i=0:i \neq j}^n y_{jih} \quad \forall h \in H, j \in N \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{0jh} \leq 1 \quad \forall h \in H \quad (12)$$

$$d_{ijkh} \leq D_{ij} \times x_{ijkh} \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, h \in H \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^q d_{ijkh} = X_{ij} \times D_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (14)$$

$$t_{ijkh} = 60 \times \frac{d_{ijkh}}{v_{ijk}} \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, h \in H \quad (15)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} t_{ijkh} \leq e_k - b_k \quad \forall k \in K, h \in H \quad (16)$$

$$l_i \leq e_k - t_{ijkh} + e_m \times (1 - x_{ijkh}) \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, h \in H \quad (17)$$

$$a_j \geq b_k + t_{ijkh} - e_m \times (1 - x_{ijkh}) \quad \forall (i,j) \in A, k \in K, h \in H \quad (18)$$

$$a_j \geq l_i + \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^q t_{ijkh} - e_m \times (1 - X_{ij}) \quad \forall (i,j) \in A \quad (19)$$

$$a_i + g_i \leq l_i \quad \forall i \in N' \quad (20)$$

$$a_0 \leq e_m \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^n R_j \times y_{ijh} \leq C_h \quad \forall h \quad (22)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} D_{ij} \times y_{ijh} \leq L_h \quad \forall h \quad (23)$$

$$O_i \geq a_i - E_i \quad \forall i \in N' \quad (24)$$

$$d_{ijkh}, t_{ijkh} \geq 0 \quad (25)$$

$$l_i, a_i, O_i \geq 0 \quad (26)$$

$$X_{ij}, y_{ijh}, x_{ijkh} \in \{0,1\} \quad (27)$$

No problema GVRSP, as restrições (6) e (7) asseguram que cada cliente é visitado só uma vez. Na restrição (8) é assegurado que um determinado arco selecionado pode ser viajado unicamente por um veículo. As restrições (9) e (10) forçam a variável y_{ijh} a ser consistente com a variável x_{ijkh} . A restrição (11) impõe que cada veículo entra e sai num dado nó o mesmo número de vezes. Na restrição (12) é indicado que cada veículo deixa unicamente uma vez o armazém, não podendo ser usado novamente. A restrição (13) assegura que a variável $d_{ijkh} = 0$ caso $x_{ijkh} = 0$, por outro lado, caso $x_{ijkh} = 1$ então a variável d_{ijkh} toma o valor de D_{ij} . A restrição (14) garante que toda a distância do arco (i, j) é percorrida assim que ele é selecionado. Na restrição (15) é calculado o tempo de viagem necessário para percorrer d_{ijkh} , de ter em conta que o tempo de viagem é obtido em segundos e a velocidade deve se encontrar em milhas por hora. A restrição (16) assegura que o tempo de viagem de cada veículo em cada período de tempo é inferior à duração desse período de tempo, assegurando que a velocidade não se altera entre cada cliente. Na restrição (17) é definido que se o arco (i, j) é viajado no período de tempo k , a hora de partida do nó i deve ser antes do final do período de tempo k subtraído pelo tempo de viagem associado ao arco (i, j) no período de tempo k . Por

outro lado, a restrição (18) impõe que o tempo de chegada ao nó j deve ser inferior ou igual ao horário de início do período de tempo k mais o tempo de viagem associado ao arco (i, j) no período de tempo k . De ter com conta que estas duas últimas equações só estão ativas quando $x_{ijkh} = 1$. A restrição (19) calcula qual o tempo de chegada mais cedo ao nó j e só é ativada caso o arco (i, j) seja selecionado. Na restrição (20) é imposto que o tempo de partida deve ser de cada nó i necessita ser o seu tempo de chegada mais o tempo de serviço associado ao nó i . As restrições servem também para eliminar as sub rotas entre clientes. A restrição (21) assegura que o tempo de retorno ao armazém não deve exceder o final do último período de tempo. As restrições (22) e (23) dizem respeito as capacidades de carga e autonomia, respetivamente, de cada veículo h . Na restrição (24) é efetuado o cálculo do atraso no nó i . Por fim, nas equações (25) e (26) é garantida a não negatividade das variáveis aí presentes e na equação (27) é imposto que as variáveis x_{ijkh} , y_{ijh} e X_{ij} sejam binárias.

3.4.1 Modificações à formulação

Com a implementação da formulação e o aprofundar das experiências praticadas, os resultados apresentavam valores que não correspondiam ao esperado. Por vezes, as viagens entre clientes eram repetidas em períodos de tempo distintos, inclusive as saídas do armazém e chegadas ao mesmo tempo, por vezes, acontecerem em vários períodos de tempo. Este problema existia, pois, a variável usada para fazer o controlo de saída do armazém não tinha em conta o período de tempo, este controlo só era feito na saída do armazém pela equação (12), usava a variável binária y_{ijh} , que só controlaria a quantidade de vezes que cada veículo saía do armazém. De forma a limitar esta situação foi eliminada a equação (12) e foram adicionadas três novas equações (28), (29) e (30) usando a variável binária x_{ijkh} que já tem em conta o período de tempo k . Na equação (28) é restringida a saída de veículos do armazém saindo uma única vez num único período de tempo, o mesmo acontece na equação (29), no entanto na chegada ao armazém. A equação (30) usa o mesmo princípio de funcionamento da equação (28) e (29), no entanto restringe as viagens entre clientes a não se realizarem em vários períodos de tempo.

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{0jkh} \leq 1 \quad \forall h \in H \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n x_{i0kh} \leq 1 \quad \forall h \in H \quad (29)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijkh} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A, h \in H \quad (30)$$

De forma a poder ser comparada a performance desta função objetivo foram usadas mais duas funções objetivo muito comuns na literatura, minimização de distância percorrida e minimização de tempo de viagem. Estas funções objetivo serviram para perceber o impacto do congestionamento na logística urbana, pois, em nenhuma delas é tido em conta as emissões de CO₂, que é a forma utilizada para diminuir a distância percorrida em horários de congestionamento.

$$\text{Minimize } D = \sum_{h=1}^q \sum_{i=0}^n \sum_{j=0:i \neq j}^n \sum_{k=1}^m d_{ijkh} + \sum_{i=0}^n \omega_i \times O_i$$

$$\text{Minimize } T = \sum_{h=1}^q \sum_{i=0}^n \sum_{j=0:i \neq j}^n \sum_{k=1}^m t_{ijkh} + \sum_{i=0}^n \omega_i \times O_i$$

3.5 Resultados

3.5.1 Análise das rotas

Com a aplicação da formulação anteriormente descrita e funções objetivo é possível observar o perfil das rotas resultantes de cada função objetivo. O número de clientes visitados em cada rota é limitado por um lado pela autonomia dos veículos e sua capacidade de carga e, por outro lado, existe também a limitação de horário máximo de visita a cada cliente.

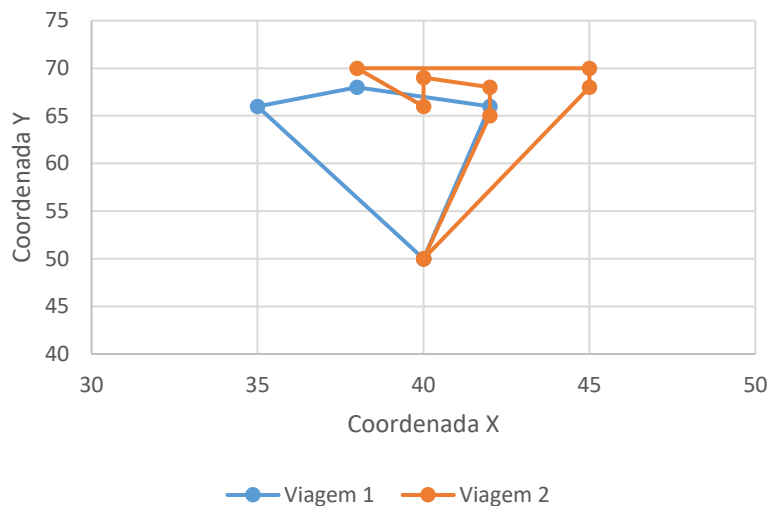


Figura 10- Rotas de Distância Percorrida

Na Figura 10 é apresentado o perfil de rotas resultante da função objetivo que minimiza a distância percorrida e na Figura 11 da função objetivo que minimiza o tempo de viagem, onde é possível verificar que em ambos os casos são utilizados unicamente dois veículos e a ordem pela qual os clientes são visitados é muito semelhante. O facto de nestas funções objetivo não ter sido tido em conta o congestionamento, direcionou à utilização de veículos de maiores dimensões levando a que cada veículo para satisfazer a necessidade dos clientes exista uma maior probabilidade de incorrer em períodos de congestionamento, esta possibilidade será estudada mais tarde.

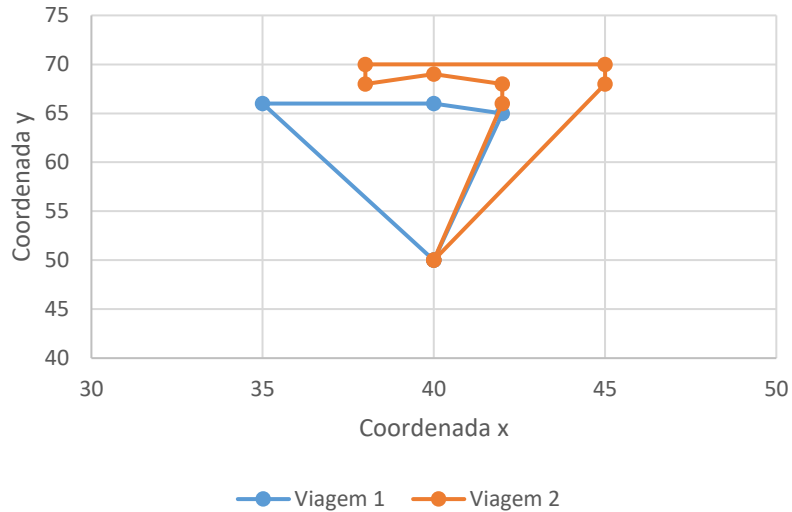


Figura 11- Rotas de Tempo de Viagem

No que diz respeito à função objetivo de minimização das emissões, Figura 12, o cenário já não é o mesmo como seria de esperar. A utilização de viaturas de menor capacidade de carga e, por consequência, menores emissões levou à necessidade do uso de três viaturas de forma a visitar todos os clientes e satisfazer as suas necessidades de produto. O uso de três viaturas poderá permitir de forma mais eficaz a seleção dos períodos sem congestionamento.

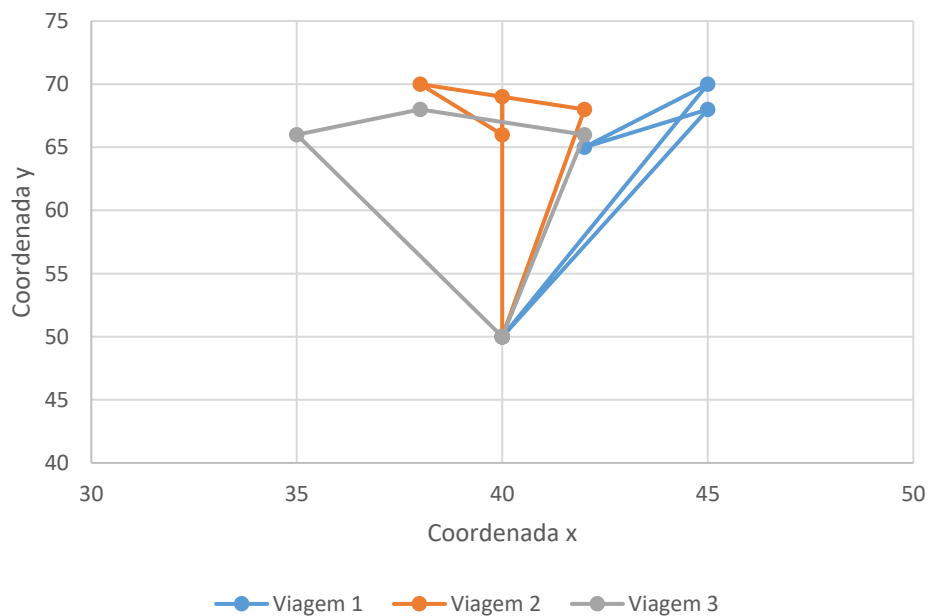


Figura 12- Rotas de Emissões

Na Figura 12 é revelado o perfil de rotas, este possui uma viagem em comum (Viagem 3) com o perfil de rotas de minimização de distância percorrida (Viagem 1, Figura 10), explicada pela ligação entre estas duas análises tendo as duas em conta a distância percorrida, que no caso da função objetivo minimiza as emissões essa distância é multiplicada pelas gramas de CO₂ emitidas por unidade de distância. As restantes duas rotas resultaram na divisão da Viagem 2 da Figura 10 em duas viagens, Viagem 1 e Viagem 2.

3.5.2 Análise da utilização de veículos

Na Figura 13, é espelhada a utilização de cada tipo de veículo por unidades de distância percorrida, lembrando que os veículos ID1 e ID2 são os de menores dimensões e com menor capacidade de carga, evidenciando-se como sendo os veículos que apresentam valores de emissão mais baixos. É inequívoco que a utilização dos veículos ID1 e ID2 só acontece com a função objetivo de minimização de emissões em que os mesmos percorrem 67% da distância total percorrida neste modelo. Contudo, os veículos ID5 são somente utilizados pelas restantes funções objetivo devido à sua capacidade de carga elevada, os valores de emissões são também elevados, sendo responsáveis por mais de 50% da distância total percorrida nestes modelos. No que diz respeito ao veículo ID3, a sua utilização nula pode ser justificada pelas suas elevadas emissões por capacidade de carga não sendo um veículo compensatório nesta situação. Por outro lado, o veículo ID4 é utilizado por todas as funções objetivo e, portanto, possui um bom compromisso entre as emissões que lhe estão subjacentes e a sua capacidade de carga.

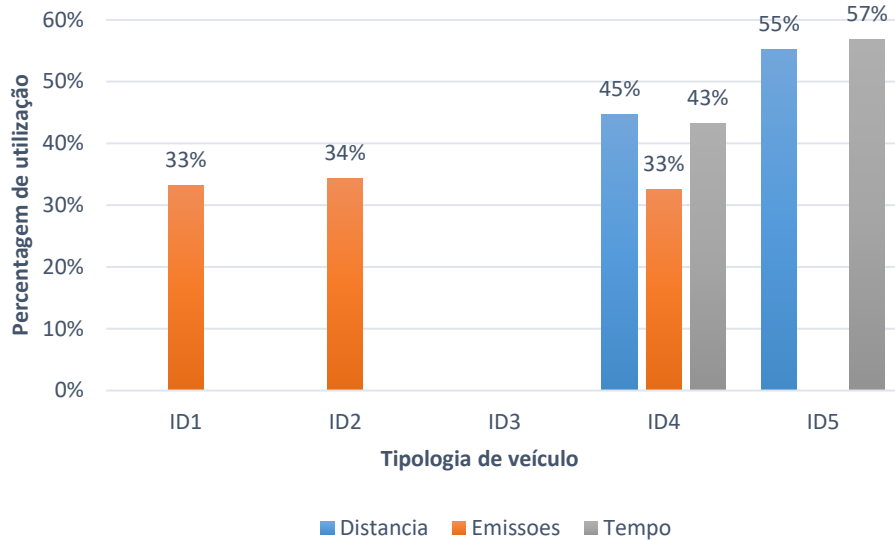


Figura 13- Utilização de Veículos

3.5.3 Congestionamento

No que diz respeito às janelas temporais em que foram assumidas como horários em que existiria congestionamento e, por consequência, a velocidade seria inferior e as emissões mais elevadas, quando olhamos para os valores obtidos a partir das funções objetivo de minimização de tempo de viagem, Figura 14, é clara a preferência pelos horários sem congestionamento devido à velocidade mais elevada assumida nesses períodos temporais, ainda assim 7% da distância percorrida nesta abordagem realiza-se em período de congestionamento.

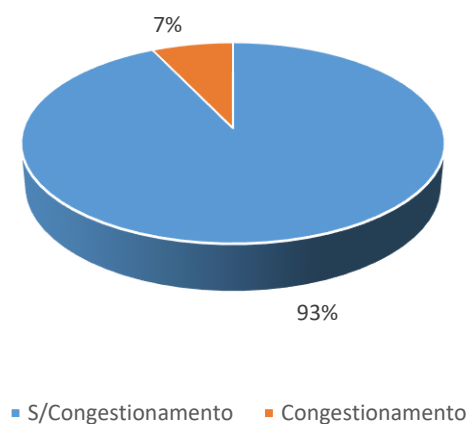


Figura 14- Congestionamento em Tempo de Viagem

O cenário é análogo quando observamos os resultados da abordagem que minimiza a distância percorrida como se pode constatar na Figura 15.

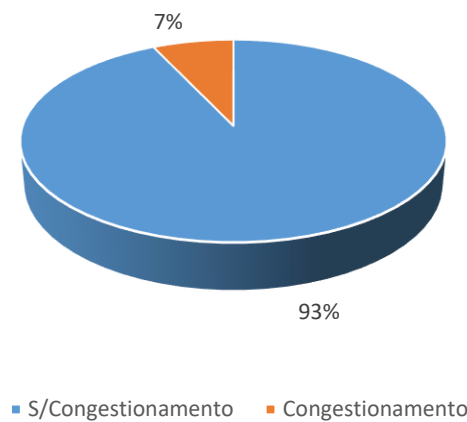


Figura 15- Congestionamento em Distância Percorrida

Sendo o principal objetivo deste trabalho perceber o impacto do congestionamento na logística urbana e obter um modelo que incorpora o mesmo, o resultado obtido a partir da Figura 16 prova esse compromisso em evitar as janelas temporais que corresponderiam aos horários de congestionamento apesar de já nas restantes funções objetivo o valor ser baixo pode-se observar ainda um decréscimo de 3% face às anteriores.

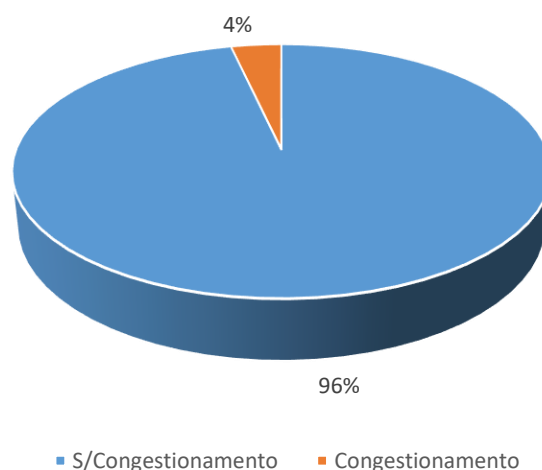


Figura 16- Congestionamento em Emissões

Podemos então concluir que a implementação do modelo de cálculo de emissões com o objetivo de perceber qual o impacto do congestionamento na definição de rotas foi

atingido com sucesso, pois, quando usamos as emissões como fator a minimizar a distância percorrida em período de congestionamento diminui significativamente.

3.5.4 Fatores de performance

Foram admitidos como fatores de performance das funções objetivo, 3 pontos importantes a ter em conta na definição de uma sequência de visitas a clientes, as penalizações de atraso que possam ocorrer devido ao incumprimento dos prazos estipulados pelos clientes, a distância percorrida que está diretamente ligada às emissões de CO₂ emitidas pelos veículos e por fim as emissões consequentes das rotas resultantes de cada função objetivo.

Na Figura 17 é perceptível o incumprimento das janelas temporais estabelecidas pelos clientes quando a função objetivo tem como principal foco a diminuição do tempo de viagem, em que no caso de uma amostra de cinco clientes se torna bastante mais evidente. Por outro lado, as restantes funções objetivo têm o mesmo valor de penalizações de atraso, podendo as mesmas ser explicadas pela velocidade assumida não permitir que o veículo se desloque ao primeiro cliente antes que o período de receção dos produtos terminasse.

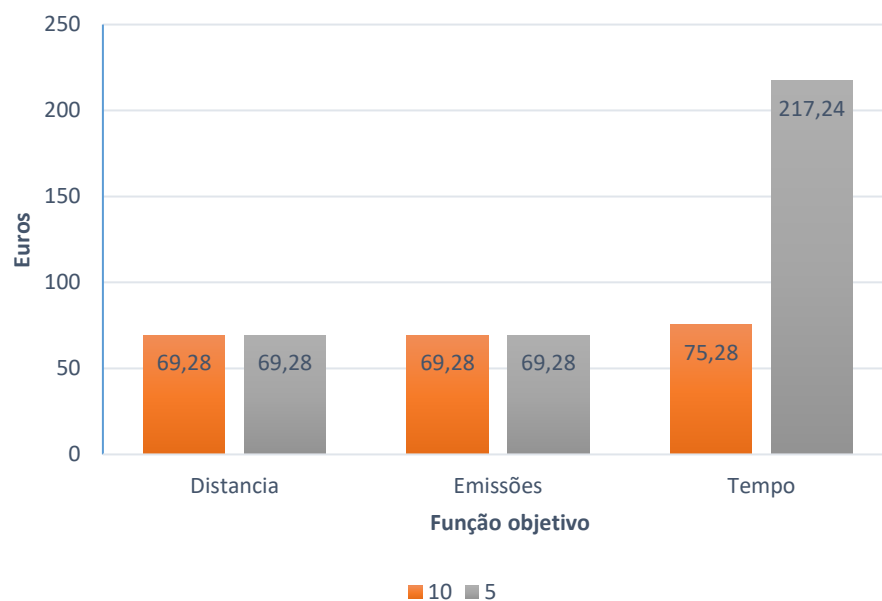


Figura 17- Penalizações de atraso

A distância percorrida, Figura 18, é mais elevada quando a minimização das emissões é o principal objetivo, isto deve-se ao facto de o modelo apresentado ter em conta diferentes velocidades em diferentes períodos temporais, assim como, uma frota de veículos heterogénea proporcionando uma escolha do veículo a utilizar de forma a diminuir a quantidade total de CO₂ emitidas, facilitando mesmo a utilização de mais veículos mantendo as emissões em valores inferiores.

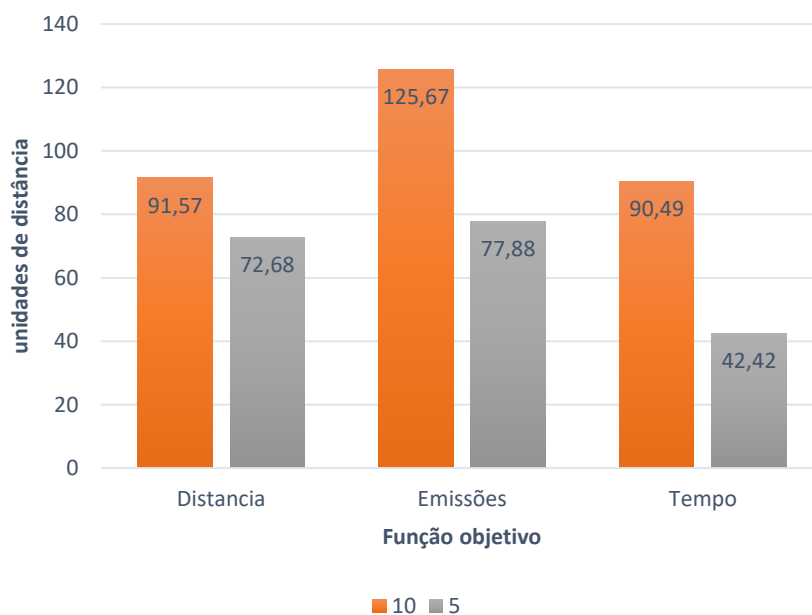


Figura 18- Distância total percorrida

Na Figura 19, é evidente o impacto que o modelo de emissões e função objetivo tem na quantidade total de emissões de CO₂ resultantes das visitas dos clientes, pois a função objetivo que minimiza as emissões apresenta valores notoriamente inferiores. Quando falamos das emissões resultantes das funções objetivo que minimizam a distância e o tempo total de viagem os valores obtidos são muito similares.

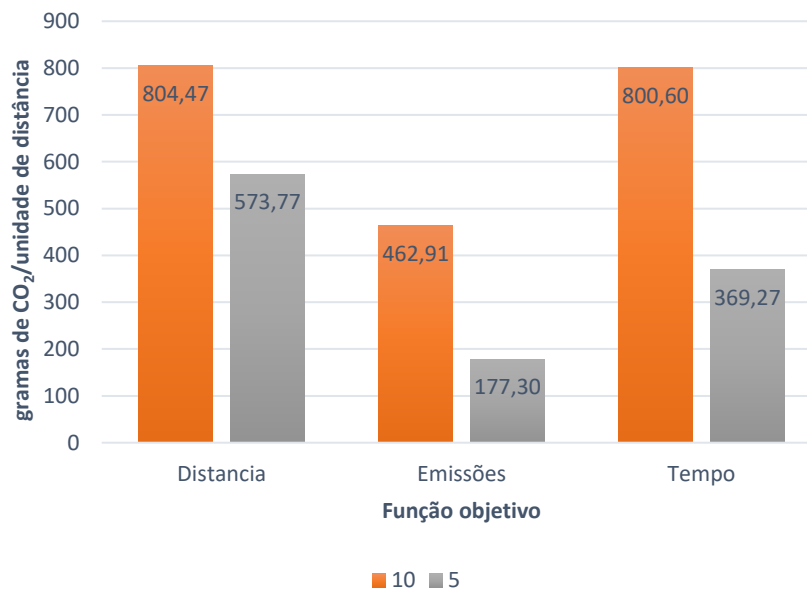


Figura 19- Emissões totais

Na Tabela 6 é resumida toda a informação obtida a partir da experimentação das funções objetivo com recurso ao aumento percentual em cada um dos fatores de performance, onde é evidente a redução de emissões com recurso à função objetivo de minimização de emissões através de uma escolha eficaz de período de tempo em que as viagens entre clientes são efetuadas de forma a evitar o congestionamento, assim como o veículo utilizado. No que diz respeito às restantes funções objetivo, os fatores de performance, redução de tempo de viagem e distância percorrida, apresentam uma redução significativa, no entanto, para que estes valores sejam possíveis foram utilizados veículos de maiores dimensões satisfazendo as necessidades de cada cliente em menos viagens, em que no caso da função objetivo de minimização de distância não resultou num aumento de penalização de atraso face à função objetivo de minimização de emissões, ao contrário da função objetivo de minimização de tempo de viagem, que apesar de apresentar menores emissões que a última, apresenta penalizações de atraso muito superiores, procedendo a uma maior insatisfação dos clientes. Além disso, o uso de viaturas de menores dimensões nas zonas urbanas leva a uma maior fluidez do trânsito.

Tabela 6- Síntese de resultados

Função objetivo	Emissões		Distância Percorrida		Tempo de Viagem	
	5	10	5	10	5	10
Emissões	177,30	462,91	69%	42%	52%	42%
Distância	77,88	125,67	-7%	-37%	-84%	-39%
Penalização de atraso	69,28	69,28	0%	0%	8%	68%

Em suma, os resultados seguiram o caminho que era esperado. A formulação matemática e o modelo de emissões adotado permitiram a otimização das rotas de forma e baixar as emissões de CO₂ e, por consequência, diminuir o congestionamento. Com recurso à escolha mais otimizada da altura do dia em que o veículo deve efetuar determinada viagem, assim como a própria escolha do veículo, resultou numa diminuição de aproximadamente metade das emissões face às restantes abordagens que não têm em conta as emissões das suas viagens. Esta redução das emissões levou a que como concluído no capítulo 3.5.3 a distância percorrida em horários de congestionamento diminuísse.

3.5.5 Variação do perfil de localização dos clientes

A base de dados aplicada retratava um armazém que servia um conjunto de clientes que se pode considerar que se encontravam todos na mesma região. Assim sendo foram aplicadas mais duas amostras de dez clientes, a primeira pode ser comparada a um armazém central com clientes em diversas regiões, e a segunda diz respeito a uma posição aleatória no que diz respeito aos clientes e ao armazém. Na Figura 20 é exposta

o perfil de rotas resultantes da função objetivo de minimização de emissões de CO₂ com base numa amostra de clientes em que é simulada a visita a clientes em diferentes regiões, demonstrando-se que a formulação apresentada é capaz de resolver este perfil de amostra de clientes.

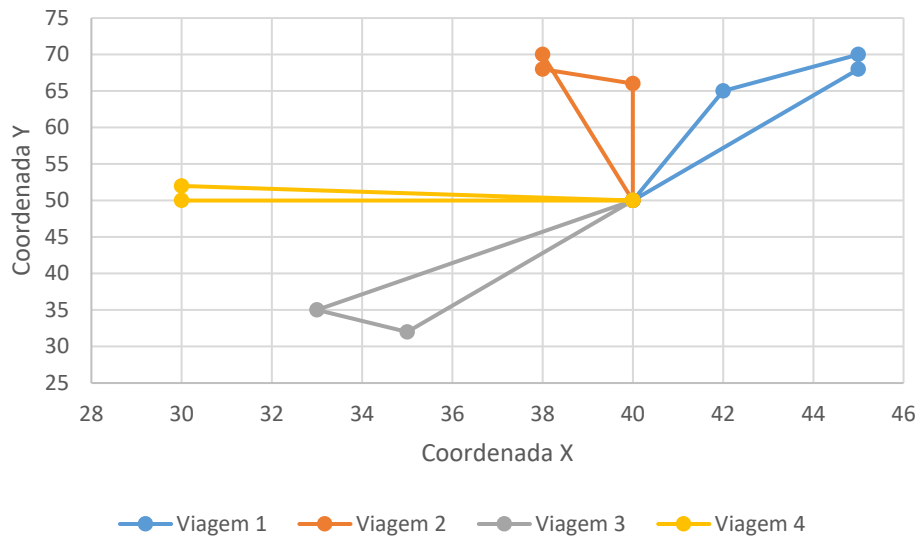


Figura 20- Rotas de População 2

Por outro lado, na Figura 21 é demonstrado o perfil de rotas resultante de uma amostra de clientes com localização aleatória apresentando também bons resultados como demonstrado de seguida.

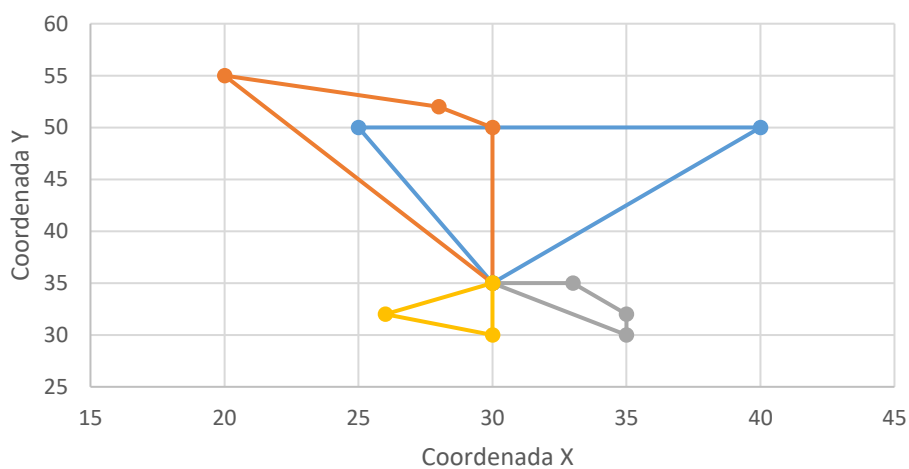


Figura 21- Rotas de População 3

Na Figura 22 é possível observar o valor das emissões para cada função objetivo (Emissões, Distância, Tempo) nas diferentes populações. A aplicação de diferentes amostras de localização de clientes não levou a grandes variações de proporcionalidade entre os resultados obtidos, ou seja, as utilizações dos períodos de congestionamento continuaram a ser significativamente inferiores com a função objetivo de minimização das emissões.

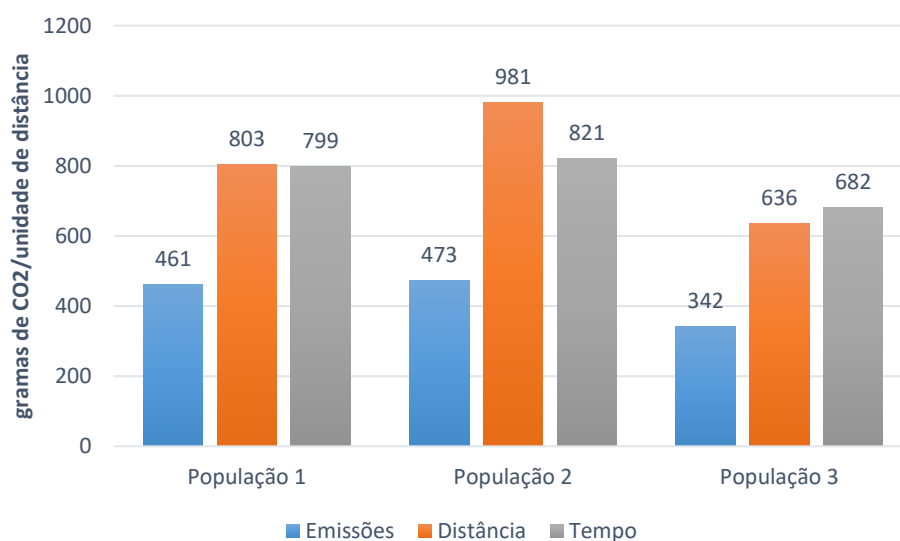


Figura 22- Valor de emissões nas diferentes populações

No que diz respeito ao tempo de simulação, a diferença no tempo de simulação é bastante significativa. No caso em que os dados de localização de clientes são agrupados o tempo de simulação observado foi em média 560 segundos, como apresentado na Figura 23, quando falamos de dados em que as localizações são mais aleatórias o tempo de simulação diminuiu drasticamente, chegando no caso da População 3 aos 19 segundos.

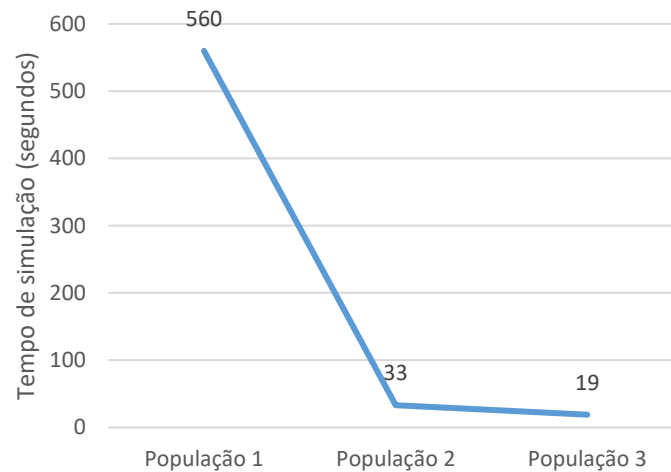


Figura 23-Tempo de simulação

Outro dado importante que deve ser tido em conta, é o *Gap*, sendo o mesmo a diferença percentual entre o valor da solução obtida e a melhor solução possível. Os valores ilustrados na Figura 24 demonstram o baixo desfasamento entre a solução obtida e a melhor solução possível, sendo que um *Gap* inferior a 10% é considerado aceitável.

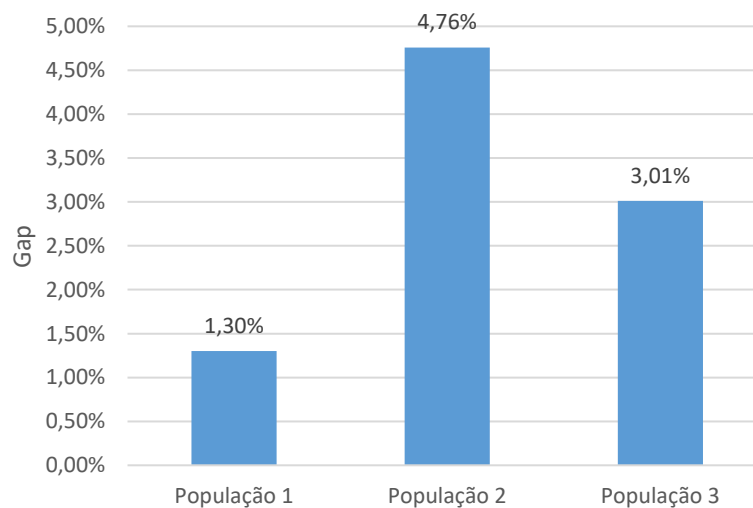


Figura 24- Gap

Os resultados apresentados na Figura 23 e Figura 24 foram obtidos através de uma média de cinco simulações para cada base de dados de clientes.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Sendo o principal foco deste trabalho perceber qual o impacto do congestionamento na logística urbana, os conhecimentos adquiridos durante a licenciatura de Engenharia Mecânica Automóvel tornam-se preponderantes na percepção do papel que cada variável existente nos problemas VRP e nos modelos de cálculo de emissões de CO₂ têm na definição de uma rota, assim como na escolha do veículo ideal para a mesma.

É recorrente o foco das estratégias logísticas recaírem na diminuição de custos fixos, no entanto, um correto roteamento permite um maior aproveitamento dos recursos disponíveis que, por consequência, leva a que exista um controlo dos custos fixos, e por outro lado, permite a redução do impacto ambiental que a atividade de determinada entidade produz.

De forma a implementar uma formulação capaz de ter em conta o congestionamento e, conseqüentemente, as emissões de CO₂ foi necessário definir todas as variáveis do problema. Uma das mais importantes variáveis a definir é a frota de veículos disponível para efetuar as visitas aos clientes, tipologia de veículo e dimensões adequadas ao tipo de produto a transportar. De forma a saber qual o tipo de produto a transportar e as quantidades do mesmo é necessário conhecer os clientes que pretendemos satisfazer, assim como quais as suas exigências em termos de horários de entrega e de penalizações caso a sua procura não seja entregue dentro dos prazos estipulados. Por fim, é necessário conhecer o meio em que os transportes se vão inserir e, portanto, delinear um padrão de velocidades de forma a simular o impacto que o congestionamento teria por um lado na velocidade dos veículos e, por outro lado, nas emissões provenientes das velocidades reduzidas.

Depois de conhecidas todas as variáveis do problema, foi adotada uma formulação matemática que se enquadrava com o problema proposto, no entanto, algumas

correções e melhoramentos foram necessários de forma a que os valores obtidos formassem uma resposta coerente ao problema imposto. Foi necessário aplicar um modelo de cálculo de emissões que tivesse em conta a velocidade dos veículos de modo a adaptar a formulação ao que era pretendido, perceber o impacto do congestionamento na logística urbana, modelo esse que é um dos pontos chave para um correto tratamento dos dados dos veículos resultando numa correta avaliação dos dados obtidos.

No decorrer do tratamento dos dados foi de fácil apreensão que os dados obtidos refletiam a preocupação imposta na diminuição das emissões de CO₂ e por consequência, evitar que o percurso dos veículos se efetuasse em horários de congestionamento.

Os fatores de performance estabelecidos permitiram perceber que com a frota de veículos definida previamente seria possível diminuir as emissões de CO₂ recorrendo a veículos de menores dimensões, indicados para zonas urbanas, e com menores capacidades de carga sendo a distância total percorrida maior não incorrendo em penalizações de atraso suplementares.

Através dos valores obtidos, é possível depreender também que quantos mais clientes tiver a amostra estudada, o decréscimo percentual das emissões diminui.

Como proposta de trabalhos futuros, passaria por implementar esta formulação matemática em conjunto com este modelo de emissões com uma maior amostra de clientes, de forma a simular o impacto que o aumento de clientes teria nos resultados. No entanto o programa usado não tinha capacidade de processar os dados referentes a mais do que dez clientes.

Outro ponto importante que não foi tido em conta devido a limitações do programa foi a variação de carga ao longo da viagem, ou seja, subtrair à carga total no veículo a carga que deixou em cada cliente, representando uma maior aproximação ao que observamos num cenário real podendo ter uma forte influência na quantidade de emissões emitidas, sendo um ponto fulcral na definição da rota de visita aos clientes. Apesar da tentativa

de implementação desta variável durante a realização deste trabalho a equação necessária à sua execução não era linear, continha o produto de duas ou mais variáveis, e o programa utilizado não permitia a sua implementação. Assim sendo, o uso de um *solver* em que permitisse a aplicação deste modelo de cálculo de emissões traria mais conteúdo e mais matéria de estudo.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Archetti, C., Speranza, M. G., & Hertz, A. (2006). A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem. *Transportation Science*, 40(1), 64–73. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0103>
- Archetti, Claudia, Savelsbergh, M. W. P., & Grazia Speranza, M. (2008). To split or not to split: That is the question. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.04.003>
- Baker, B. M., & Ayechew, M. A. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 30(5), 787–800. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00051-5)
- Bansal, P., & Roth, K. (2000). Why Companies Go Green: A Model of Ecological Responsiveness. *Academy of Management Journal*, 43(4), 717–736. <https://doi.org/10.5465/1556363>
- Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. *Transportation Research Record*, (2058), 163–171. <https://doi.org/10.3141/2058-20>
- Barth, M., Scora, G., & Younglove, T. (2004). Modal emissions model for heavy-duty diesel vehicles. *Transportation Research Record*, (1880), 10–20. <https://doi.org/10.3141/1880-02>
- Beaudry, A., Laporte, G., Melo, T., & Nickel, S. (2010). Dynamic transportation of patients in hospitals. In *OR Spectrum* (Vol. 32). <https://doi.org/10.1007/s00291-008-0135-6>
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232–1250. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>
- Bickel, P., Friedrich, R., Link, H., Stewart, L., & Nash, C. (2006). Introducing environmental externalities into transport pricing: Measurement and implications. *Transport Reviews*, 26(4), 389–415. <https://doi.org/10.1080/01441640600602039>
- Boriboonsomsin, K., Vu, A., & Barth, M. (2010). Eco-driving: pilot evaluation of driving behavior changes among US drivers. *University of California Transportation Center*, (August). <https://doi.org/UCTC-FR-2010-20>
- Cao, E., & Lai, M. (2010). The open vehicle routing problem with fuzzy demands. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2405–2411. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.07.021>
- Chen, S., Chen, R., & Gao, J. (2017). A monarch butterfly optimization for the dynamic vehicle routing problem. *Algorithms*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/a10030107>
- Comissão Europeia. (2014). *Transportes. Comprender as Políticas da União Europeia*. (m), 1–20. <https://doi.org/10.2775/15111>
- Comissão Europeia. (2018). No Title. Retrieved from https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). *dantzig & Ramser-VRP-1959.pdf*.
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 775–793. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033>
- Dror, M., & Trudeau, P. (1989). Savings by Split Delivery Routing. *Transportation Science*, 23(2), 141–145. <https://doi.org/10.1287/trsc.23.2.141>
- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem.

- Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Ericsson, E. (2001). Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(5), 325–345. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(01\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00003-7)
- Ericsson, E., Larsson, H., & Brundell-Freij, K. (2006). Optimizing route choice for lowest fuel consumption - Potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(6), 369–383. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>
- Felipe, A., Ortuño, M. T., Righini, G., & Tirado, G. (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71, 111–128. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.003>
- Figliozzi, M. (2010). Vehicle routing problem for emissions minimization. *Transportation Research Record*, (2197), 1–7. <https://doi.org/10.3141/2197-01>
- Franceschetti, A., Honhon, D., Van Woensel, T., Bektaş, T., & Laporte, G. (2013). The time-dependent pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 56, 265–293. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.008>
- Garcia-Najera, A., & Bullinaria, J. A. (2011). An improved multi-objective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Computers and Operations Research*, 38(1), 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.05.004>
- Goel, A., & Gruhn, V. (2008). A General Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 650–660. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.065>
- Grazia Speranza, M. (2018). Trends in transportation and logistics. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 830–836. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.032>
- Hvattum, L. M., Løkketangen, A., & Laporte, G. (2006). Solving a dynamic and stochastic vehicle routing problem with a sample scenario hedging heuristic. *Transportation Science*, 40(4), 421–438. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0166>
- INE. (2018). *Estatísticas dos Transportes e Comunicações*.
- Jabali, O., Van Woensel, T., & De Kok, A. G. (2012). Analysis of travel times and CO2 emissions in time-dependent vehicle routing. *Production and Operations Management*, 21(6), 1060–1074. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2012.01338.x>
- Jemai, J., Zekri, M., & Mellouli, K. (2012). An NSGA-II algorithm for the green vehicle routing problem. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7245 LNCS, 37–48. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29124-1_4
- Jozefowicz, N., Semet, F., & Talbi, E. G. (2006). Enhancements of NSGA II and its application to the vehicle routing problem with route balancing. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3871 LNCS, 131–142. https://doi.org/10.1007/11740698_12
- Kara, I., Kara, B. Y., & Kadri Yetis, M. (2007). Energy minimizing vehicle routing problem. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4616 LNCS, 62–71. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73556-4_9
- King, A. A., & Lenox, M. J. (2000). Industry Self-Regulation without Sanctions.pdf. *Academy of Management Journal*, Vol. 43, pp. 698–716.
- Kok, A. L., Hans, E. W., & Schutten, J. M. J. (2012). Vehicle routing under time-dependent travel times: The impact of congestion avoidance. *Computers and Operations Research*, 39(5), 910–918. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.05.027>
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., & Ng, T. W. (2014). A Genetic Algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3284–3296. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.032>
- Lorini, S., Potvin, J. Y., & Zufferey, N. (2011). Online vehicle routing and scheduling with

- dynamic travel times. *Computers and Operations Research*, 38(7), 1086–1090. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.10.019>
- Mes, M., van der Heijden, M., & van Harten, A. (2007). Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems. *European Journal of Operational Research*, 181(1), 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.051>
- Nicolai, S., & Hine, S. (2015). *A Review of Evidence Conflict*. (February).
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.015>
- Psaraftis, H. N. (1980). Dynamic Programming Solution To the Single Vehicle Many-To-Many Immediate Request Dial-a-Ride Problem. *Transportation Science*, 14(2), 130–154. <https://doi.org/10.1287/trsc.14.2.130>
- Qian, J., & Eglese, R. (2016). Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 840–848. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.009>
- Salhi, S., Imran, A., & Wassan, N. A. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers and Operations Research*, 52, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.05.011>
- Tagmouti, M., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2011). A dynamic capacitated arc routing problem with time-dependent service costs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(1), 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.02.003>
- Tang, W., Sanville, E., & Henkelman, G. (2009). A grid-based Bader analysis algorithm without lattice bias. *Journal of Physics Condensed Matter*, 21(8). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/8/084204>
- Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2002). Distribution of fresh meat. *Journal of Food Engineering*, 51(1), 85–91. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00040-1)
- Thomas, B. W. (2007). Waiting strategies for anticipating service requests from known customer locations. *Transportation Science*, 41(3), 319–331. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0183>
- Trenberth, K. E., & Fasullo, J. T. (2013). Earth ' s Future An apparent hiatus in global warming ? Earth ' s Future. *Earth's Future*, 1–14. <https://doi.org/10.1002/2013EF000165>.Received
- Van Der Voort, M., Dougherty, M. S., & Van Maarseveen, M. (2001). A prototype fuel-efficiency support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9(4), 279–296. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(00\)00038-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00038-3)
- Wen, L., Çatay, B., & Eglese, R. (2014). Finding a minimum cost path between a pair of nodes in a time-varying road network with a congestion charge. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 915–923. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.044>
- Xiao, Y., & Konak, A. (2015). Green Vehicle Routing Problem with Time-Varying Traffic Congestion. *Operations Research and Computing: Algorithms and Software for Analytics*, 134–148. <https://doi.org/10.1287/ics.2015.0010>
- Yao, B., Yu, B., Hu, P., Gao, J., & Zhang, M. (2016). An improved particle swarm optimization for carton heterogeneous vehicle routing problem with a collection depot. *Annals of Operations Research*, 242(2), 303–320. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1792-x>
- Zhu, L., & Hu, D. (2018). Study on the vehicle routing problem considering congestion and emission factors. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533260>

Anexo I

Referências Bibliográficas	Descrição do trabalho
(Pillac et al., 2013)	Neste trabalho é evidenciado que os vários avanços tecnológicos levaram a um maior interesse no roteamento dinâmico de veículos. A pesquisa classifica os problemas de roteamento da perspectiva da qualidade e evolução da informação. Depois de apresentada uma descrição geral do roteamento dinâmico, foi introduzida a noção de grau de dinamismo e apresentada uma análise abrangente das aplicações e métodos de solução para roteamento dinâmico de veículos.
(Jemai et al., 2012)	Neste artigo é apresentado e definido o <i>bi-objective</i> GVRP no contexto da logística verde. O <i>bi-objective</i> GVRP formula o problema de encontrar rotas para veículos, servindo um conjunto de clientes enquanto minimiza a distância total percorrida e as emissões de CO ₂ . Foram revistos fatores de emissão e técnicas de forma a estimar as emissões de CO ₂ , com o objetivo de as integrar no modelo GVRP.
(Felipe, Ortuño, Righini, & Tirado, 2014)	Este estudo apresenta várias heurísticas para uma variante do problema de roteamento de veículos, na qual a frota é composta por veículos elétricos com autonomia limitada e necessidade de carregamentos durante os seus transportes. Além do plano de roteamento, a quantidade de energia carregada e a energia utilizada também foi determinada. Os resultados computacionais foram analisados para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos, de forma a perceber as diferenças entre os elementos do problema (tamanho, configuração geográfica, estações de recarga, autonomia, tecnologias etc.).
(Erdoğan & Miller-Hooks, 2012)	Neste artigo é desenvolvido um modelo G-VRP de forma a ajudar organizações com frotas alternativas aos veículos movidos a combustíveis fósseis a superar as dificuldades inerentes a este tipo de soluções, como a autonomia limitada do veículo e infraestrutura de reabastecimento. Foi baseado em duas heurísticas, <i>Modified Clarke</i> e <i>Wright Savings</i> e <i>Density-Based Clustering Algorithm</i> .
(Lin, Choy, Ho, & Ng, 2014)	Neste trabalho é evidenciado que a <i>Green Logistics</i> (GL) tem surgido como uma tendência no gerenciamento da distribuição de mercadorias e na recolha de produtos em fim de vida. O modelo de otimização proposto é baseado num algoritmo (GOM) evidenciando a eficiência de custos económicos e ambientais. Foram também desenvolvidos dois modelos de roteamento de

	<p>veículos com entrega e coleta simultâneas (coleta total ou parcial). O GOM proposto foi capaz de sugerir uma orientação para a logística de prestadores de serviço que pretendem alcançar um baixo custo económico e ambiental.</p>
(Zhu & Hu, 2018)	<p>Neste trabalho é formulado um <i>Green Vehicle Routing Problem</i> (GVRP) dependente do tempo (TD-GVRP), que pretende resolver o problema do roteamento de veículos tendo em conta o consumo de combustível e o congestionamento. A comparação entre o objetivo proposto e os objetivos tradicionais de VRP mostra que o consumo de combustível pode ser bastante reduzido com a implementação do mesmo na função objetivo.</p>
(Lin et al., 2014)	<p>Este estudo mostra de que forma a Logística Verde contribui para a maximização do valor económico e ambiental, meio de reciclagem e controlo de emissões levando ao desenvolvimento sustentável da indústria. Utilizando o modelo de otimização baseado em algoritmo (GOM), é possível definir um esquema de transporte verde e eficiente na logística direta e inversa. Foram formulados e resolvidos dois modelos de roteamento de veículos com entrega e recolha simultâneas (recolha total ou parcial). Foi ainda projetado um mecanismo de geração de custo para executar uma comparação e análise abrangente de custos com base num conjunto de fatores de custo económico e ambiental, para examinar o impacto dos dois modelos sugerindo esquemas ideais de transporte.</p>
(Baker & Ayeche, 2003)	<p>Neste artigo é considerada a aplicação de um algoritmo genérico (GA) ao problema básico de roteamento de veículos (VRP), em que os clientes de procura conhecida são fornecidos a partir de um único depósito. Os veículos estão sujeitos a um limite de peso e, em alguns casos, até a um limite de distância percorrida. São ainda mencionados os resultados computacionais do GA puro apresentado, assim como os resultados adicionais usando um GA híbrido com outros métodos de pesquisa.</p>
(Kok, Hans, & Schutten, 2012)	<p>Neste trabalho várias estratégias são propostas para evitar o congestionamento, selecionando diversas entradas, alterando as sequências de serviços personalizados e alterando as atribuições dos clientes-veículos. Foi investigado o impacto destas e outras estratégias em roteamento de veículos off-line, na performance do VRP na realidade. Por este propósito, foi desenvolvido um conjunto de categorias de VRP em redes de estradas reais, e um modelo de velocidade que reflete os elementos principais do congestionamento em hora de ponta.</p>

(Qian & Eglese, 2016)	O problema considerado neste artigo é determinar rotas e planos para uma frota de veículos de entregas que minimize as emissões numa rede rodoviária em que a velocidade depende do tempo. No modelo, a rota para cada veículo deve ser determinada, assim como a velocidade do veículo em cada estrada são tratadas como uma variável de decisão. As rotas dos veículos são limitadas pela capacidade dos veículos e restrições de tempo no percurso de cada rota. O objetivo é minimizar o total das emissões no que toca a <i>Greenhouse Gas</i> (GHG) produzido, medido por um peso equivalente de CO ₂ .
(Garcia-Najera & Bullinaria, 2011)	O objetivo principal deste trabalho é encontrar um conjunto de rotas com as distâncias mais baixas, usando uma frota de veículos idênticos com capacidade e horários pré-definidos. Neste artigo é analisado e proposto um algoritmo multiobjetivo inovador, que incorpora métodos para medir a semelhança entre as soluções, de forma a resolver a função multiobjetivo.
(Jozefowicz, Semet, & Talbi, 2006)	Neste artigo foi tratado um VRP em que a distância total percorrida é minimizada, assim como o equilíbrio entre rotas. Para este problema foi proposto a implementação do Algoritmo NSGA II standard. Para aumentar a sua eficiência, dois mecanismos foram adicionados, paralelização do NSGA II por meio de um modelo de ilha e um mecanismo de diversificação elitista é adaptado para ser usado com o NSGA II.
(Yao, Yu, Hu, Gao, & Zhang, 2016)	Neste trabalho é apresentado um VRP heterogéneo aplicado à indústria do cartão com armazém de recolha. Sendo que o VRP heterogéneo com armazém de recolha é um problema complexo, foi usado o método PSO para resolver o problema. Para melhorar a performance do peso autoajustável e uma estratégia de pesquisa local.
(Xiao & Konak, 2015)	É apresentado neste artigo um modelo de programação para um GVRSP dependente do tempo com o objetivo de minimizar as emissões de dióxido de carbono e atrasos. É proposto um método de programação dinâmica exata para calcular os tempos ótimos de partida/chegada para o GVRSP, assim como foi desenvolvido um algoritmo genérico com programação dinâmica (GA-DP) para resolver o problema formulado. Experiências computacionais foram estudadas para perceber a eficiência da abordagem híbrida com resultados promissores.
(Jabali, Van Woensel, & De Kok, 2012)	Neste artigo é apresentado um modelo que considera o tempo de viagem, o combustível utilizado e os custos de emissão de CO ₂ . Especificamente, é proposta uma estrutura para determinar as emissões de CO ₂ num contexto de um VRP dependente do tempo.

	<p>A quantidade de CO₂ emitida é relacionada com a velocidade do veículo, o modelo desenvolvido considera a imposição de um limite de velocidade como parte da otimização.</p>
(Salhi, Imran, & Wassan, 2014)	<p>Neste trabalho é aprofundado o VRP com vários armazéns e uma frota de veículos variada. É proposto um método mais eficiente de pesquisa dos vizinhos. Este algoritmo reduz perto de 80% do tempo de uso do CPU. O mesmo depois de testado produziu 23 novos melhores resultados num teste de 26 bases de dados.</p>
(Claudia Archetti, Savelsbergh, & Grazia Speranza, 2008)	<p>Neste artigo é estudada a questão de quais os casos em que dividir as encomendas por dois ou mais veículos é benéfico para as instituições. O estudo e a sua análise levaram à confirmação de que dividir encomendas diminui o número de rotas, no entanto, a encomenda necessita de ser ligeiramente mais de metade da capacidade do veículo e a variação de quantidades encomendadas por parte dos clientes é baixa.</p>
(Bektaş & Laporte, 2011)	<p>É apresentado neste trabalho o <i>Pollution-Routing Problem</i> (PRP), sendo uma extensão do tradicional VRP em que a função objetivo não só tem em conta a distância percorrida, mas também as emissões, combustível e tempos de viagem e os seus respetivos custos. Os modelos matemáticos foram formulados de forma a incorporar ou não janelas temporais. Os resultados sugerem uma dificuldade acrescida, comparativamente ao VRP tradicional, em encontrar a solução ótima, no entanto tem um forte potencial no que toca a poupanças no custo total.</p>
(Franceschetti et al., 2013)	<p>Neste artigo é desenvolvido um PRP dependente do tempo, ou seja, para além das condições presentes no PRP foram adicionadas janelas temporais com velocidades inferiores, de forma a ter em conta os períodos de maior congestionamento. Foi feita uma caracterização da solução ótima de uma rota identificando sobre que condições é preferível esperar antes de partir e a quantidade de tempo associada a essa decisão. A caracterização revela também os intervalos de velocidade ótimos tendo em conta as janelas temporais, a extensão do período de congestionamento e os limites de velocidade.</p>

Anexo II

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,00	15,23	18,00	22,36	25,00	20,62	11,18	21,21	26,25	32,02	25,50
1	15,23	0,00	32,56	14,56	32,20	32,20	24,84	21,02	31,58	17,80	15,56
2	18,00	32,56	0,00	34,41	20,22	23,85	16,40	36,25	36,07	47,42	43,29
3	22,36	14,56	34,41	0,00	25,00	42,72	33,54	35,36	45,04	15,00	29,15
4	25,00	32,20	20,22	25,00	0,00	41,23	31,62	46,10	50,54	40,00	47,17
5	20,62	32,20	23,85	42,72	41,23	0,00	10,00	20,62	13,93	50,00	33,54
6	11,18	24,84	16,40	33,54	31,62	10,00	0,00	20,62	19,85	42,43	30,41
7	21,21	21,02	36,25	35,36	46,10	20,62	20,62	0,00	12,21	36,40	14,14
8	26,25	31,58	36,07	45,04	50,54	13,93	19,85	12,21	0,00	48,10	26,25
9	32,02	17,80	47,42	15,00	40,00	50,00	42,43	36,40	48,10	0,00	25,00
10	25,50	15,56	43,29	29,15	47,17	33,54	30,41	14,14	26,25	25,00	0,00

Anexo III

CUST NO.	XCOORD.	YCOORD.	DEMAND	READY TIME	DUE DATE	SERVICE TIME
1	40.00	50.00	0.00	0.00	1236.00	0.00
2	45.00	68.00	10.00	912.00	967.00	90.00
3	45.00	70.00	30.00	825.00	870.00	90.00
4	42.00	66.00	10.00	65.00	146.00	90.00
5	42.00	68.00	10.00	727.00	782.00	90.00
6	42.00	65.00	10.00	15.00	67.00	90.00
7	40.00	69.00	20.00	621.00	702.00	90.00
8	40.00	66.00	20.00	170.00	225.00	90.00
9	38.00	68.00	20.00	255.00	324.00	90.00
10	38.00	70.00	10.00	534.00	605.00	90.00