



Garantia de estabilidade da carga no abastecimento de postos de combustível

ROBERTO GONÇALVES DA PAIXÃO

Agosto de 2022

Garantia de estabilidade da carga no abastecimento de postos de combustível

Roberto Gonçalves da Paixão

1170389

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



Assuring load stability in petrol station replenishment

Roberto Gonçalves da Paixão

1170389

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Department of Mechanical Engineering



JÚRI

Presidente

Grau Académico e Nome
Categoria, Instituição

Orientador

Grau Académico e Nome
Categoria, Instituição

Co-Orientadora

Grau Académico e Nome
Categoria, Instituição

Arguente

Grau Académico e Nome
Categoria, Instituição

Agradecimentos

Após todos estes meses de trabalho, gostaria de fazer um agradecimento:

- Aos meus pais, Alzira e David, e à minha irmã, Raquel, pela oportunidade e pelo apoio para cumprir este objetivo da minha carreira académica;
- Ao Professor António Galvão, orientador, por encaminhar o trabalho e pelos conhecimentos transmitidos;
- À Professora Elsa Silva, co-orientadora, pela competência científica, insistência em ir sempre mais além, constante apoio e disponibilidade;
- Ao David, João, Marco e à Esmeralda pela ajuda e palavras prestadas, não só durante a elaboração da tese mas durante todo o meu percurso académico;
- A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Distribuição de combustível; LDD; PLIM; Legislação; Segurança.

RESUMO

Cerca de 31% de toda a energia consumida em Portugal está reservada ao transporte rodoviário, ou seja, a disponibilidade de combustíveis rodoviários é indispensável (direta ou indiretamente) a toda a população. Com valores desta escala é fácil perceber a importância da distribuição do combustível pelos postos de combustível espalhados pelo país.

Desde o transporte do crude até ao transporte entre centro de distribuição e posto de combustível surgem várias instâncias de transporte. Este trabalho foca-se na instância final, entre o centro de distribuição e o vendedor final. De modo a que esta operação seja bem sucedida é necessário todo um planeamento, desde o roteamento até à alocação do combustível nos compartimentos do veículo-cisterna.

Este trabalho tem como objetivo garantir a segurança durante todo o transporte de combustível até aos postos de combustível. Através da construção do *Load Distribution Diagram* é possível avaliar se em algum momento da viagem o veículo se encontra em não conformidade com as normas de segurança e legislação aplicáveis ao transporte de matérias perigosas. Será desenvolvido um modelo matemático de programação linear inteira mista que permitirá não só avaliar o factor segurança como aprovisionar a carga pelos diversos compartimentos do veículo de transporte.

O sistema foi testado utilizando dados reais, o que permitiu a validação do modelo. Através de pequenas mudanças na função objetivo do modelo é possível otimizar a solução perante o que quisermos priorizar, minimizar custos ao minimizar a quantidade de compartimentos alocados a um posto de combustível, maximizar lucros ao maximizar a quantidade de combustível entregue ou ainda melhorar a segurança ao longo de toda a rota através da minimização da distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga.

KEYWORDS

Fuel Distribution; LDD; MILP; Legislation; Safety.

ABSTRACT

About 31% of all energy used in Portugal is reserved for road transport purposes, this means that the availability of fuel for road use is indispensable (directly or indirectly) for all the population. With values of this proportion it's easy to understand the importance of fuel distribution by the petrol stations across all the country.

From the crude oil transport to the transport between the distribution center and the gas station, there are several transport instances. This dissertation focuses on the final instance between the distribution center and the final seller. To make this operation successful, all planning is required, from routing to allocating the fuel in the tank-vehicle compartments.

This work aims to ensure safety throughout the whole transport of fuel to the petrol stations. By constructing *Load Distribution Diagram* it is possible to assess whether, at any time during the trip, the vehicle is not in compliance with the safety standards and legislation applicable to the transport of dangerous goods. A mathematical model of mixed integer linear programming will be developed, and it will not only allow the evaluation of the safety factor but also to distribute the load along all the different compartments of the tank-vehicle.

The system was tested using real data, which allowed the validation of the model. Through small changes in the model's objective function it is possible to optimize the solution to what we want to prioritize: minimize costs by minimizing the number of compartments allocated to a gas station, maximize profits by maximizing the amount of fuel delivered or even improve safety along the entire route by minimizing the distance between the front of the tank and the load's center of gravity.

NOMENCLATURA

Abreviaturas

TSP	Travelling Salesman Problem
VRP	Vehicle Routing Problem
PVRP	Periodic Vehicle Routing Problem
MCVRP	Multi-Compartment Vehicle Routing Problem
MCVRPTW-AD	Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Time Windows with Adjustable Demands
VRPAFVFFT	Vehicle Routing Problem for Alternative Fuel Vehicles with Fixed Fueling Time
CMPDVRPE	Collaborative Multidepot Petrol Distribution Vehicle Routing Problem under Emergency conditions
IRP	Inventory Routing Problem
FTP	Fuel Replenishment Problem
PRP	Polution Routing Problem
GTPP	Generalized Trip Packing Problem
TDP	Truck-Dispatching Problem
MCGP	Minimum-Cost Flow Problem
TLP	Tank Loading Problem
RP	Routing Problem
FRP	Fuel Replenishment Problem
PSRP	Petrol Station Replenishment Problem
MPPSRP	Multi-Period Petrol Replenishment Problem
PSRPTW	Petrol Station Replenishment Problem with Time Windows
PPSRP	Periodic Petrol Station Replenishment Problem
PSRP-AD	Petrol Station Replenishment Problem with Adjustable Demands
CMPSRPMT	Collaborative Multidepot Petrol Station Replenishment Problem with Multicompartments and Time Window Assignment
HPSRP	Highway Petrol Station Replenishment Problem
MPSRPTW	Multi-Depot Petrol Station Replenishment Problem with Time Windows
PPSRP-SC	Periodic Petrol Station Replenishment Problem with Service Choice
VND	Variable Neighborhood Descent
ALNS	Adaptive Large Neighborhood Search
AVNS	Adaptive Variable Neighborhood Search
FJA	Fisher and Jaikumar Algorithm

GA	Genetic Algorithm
GAPMX	Genetic Algorithm with Partially Mapped Crossover Operator
PSO	Particle Swarm Optimization
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization
MOM-HMT	Multi-objective Optimization Model for Hazardous Material Transportation
MIP	Mixed Integer Programming
ILP	Integer Linear Programming
MILP	Mixed Integer Linear Programming
VND	Variable Neighborhood Descent
ALNS	Adaptive Large Neighborhood Search
AVNS	Adaptive Variable Neighborhood Search
FJA	Fisher and Jaikumar Algorithm
GA	Genetic Algorithm
GAPMX	Genetic Algorithm with Partially Mapped Crossover Operator
PSO	Particle Swarm Optimization
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization
MOM-HMT	Multi-objective Optimization Model for Hazardous Material Transportation
MIP	Mixed Integer Programming
ILP	Integer Linear Programming
MILP	Mixed Integer Linear Programming

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 CONSUMO BRUTO DE ENERGIA EM PORTUGAL (DGEG, 2021)	4
FIGURA 1.2 EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS EM PORTUGAL (DGEG, 2021)	5
FIGURA 1.3 FASES DO CAMINHO PERCORRIDO PELOS COMBUSTÍVEIS (ERSE, 2021)	6
FIGURA 1.4 EMPRESAS LIGADAS ÀS DIVERSAS FASES (ERSE, 2021)	6
FIGURA 1.5 QUANTIDADE DE PRODUTOS FINAIS PRODUZIDOS NA REFINARIA DE SINES (GALP PORTUGAL)	7
FIGURA 1.6 OLEODUTOS DA CLC (COMPANHIA LOGÍSTICA DE COMBUSTÍVEIS)	7
FIGURA 1.7 CONFIGURAÇÕES RELATIVAMENTE AO NÚMERO DE COMPARTIMENTOS (ANSTER TRAILERS)	9
FIGURA 1.8 PLACAS LONGITUDINAIS DAS CISTERNAS (ANSTER TRAILERS)	10
FIGURA 1.9 MÉTODOS DE CARGA DA CISTERNA (ANSTER TRAILERS)	11
FIGURA 1.10 VÁLVULAS DE DESCARGA DA CISTERNA (ANSTER TRAILERS)	11
FIGURA 2.1 VEÍCULO CISTERNA A TRANSPORTAR GASOLINA (INTERVIR.PT)	21
FIGURA 2.2 DIMENSÕES MÍNIMAS OBRIGATÓRIAS DAS PLACAS-ETIQUETAS, FONTE: ADR	22
FIGURA 2.3 CORES DAS PLACAS-ETIQUETAS PARA SUBSTÂNCIAS DE CLASSE 3, FONTE: ADR	22
FIGURA 2.4 DIMENSÕES DOS PAINÉIS LARANJA, FONTE: ADR	23
FIGURA 2.5 COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE UM TSP E UM VRP (W.-Y. LIU ET AL., 2014)	28
FIGURA 2.6 DIFERENÇA ENTRE CONFIGURAÇÕES DE COMPARTIMENTOS(OSTERMEIER & HÜBNER, 2018)	30
FIGURA 3.1 REPRESENTAÇÃO DAS VARIÁVEIS NECESSÁRIAS AO CÁLCULO DO <i>LDD</i>	41
FIGURA 3.2 <i>LDD</i> - REPRESENTAÇÃO DA RESTRIÇÃO DE CARGA MÁXIMA NO EIXO FRONTAL	42
FIGURA 3.3 <i>LDD</i> - REPRESENTAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE CARGA MÁXIMA NO EIXO FRONTAL E TRASEIRO	43
FIGURA 3.4 <i>LDD</i> - REPRESENTAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE CARGA MÁXIMA NO EIXO FRONTAL E TRASEIRO E PESO BRUTO	44
FIGURA 3.5 <i>LDD</i> - REPRESENTAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE CARGA MÁXIMA NO EIXO FRONTAL E TRASEIRO E PESO BRUTO E CARGA MÍNIMA NO EIXO DIRECIONAL	45
FIGURA 3.6 REPRESENTAÇÃO DO <i>LDD</i> COMPLETO	46
FIGURA 3.7 EXEMPLO DE <i>LDD</i> EM CONFORMIDADE COM OS LIMITES	47
FIGURA 3.8 EXEMPLO DE <i>LDD</i> EM NÃO CONFORMIDADE COM OS LIMITES	48
FIGURA 3.9 EVOLUÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE AO LONGO DE TODA A ROTA NO <i>LDD</i>	49
FIGURA 4.1 COMPORTAMENTO DO CASO CRÍTICO DE CADA ROTA NO <i>LDD</i>	61
FIGURA 4.2 EXEMPLO DA ALOCAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS (ROTA 2)	62
FIGURA 4.3 COMPORTAMENTO DO CASO CRÍTICO DE CADA ROTA NO <i>LDD</i> AO MAXIMI- ZAR A QUANTIDADE ENTREGUE	64
FIGURA 4.4 COMPARAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO CENTRO DE GRAVIDADE PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1	QUANTIDADE DE GASOLINA E GASÓLEO VENDIDOS EM 2020 (DGEG, 2021)	5
TABELA 2.1	INFORMAÇÃO NECESSÁRIA PARA A DISTRIBUIÇÃO DE GASOLINA, FONTE: ADR	18
TABELA 2.2	CARACTERIZAÇÃO DE CISTERNA DO TIPO LGBF, FONTE: ADR	19
TABELA 2.3	INFORMAÇÃO NECESSÁRIA PARA A DISTRIBUIÇÃO DE GASÓLEO, FONTE: ADR	20
TABELA 2.4	TABELA-RESUMO DOS PROBLEMAS DESCRITOS	36
TABELA 4.1	PROCURA EM LITRO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEL DA ROTA 1	59
TABELA 4.2	PROCURA EM LITRO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEL DA ROTA 2	60
TABELA 4.3	PROCURA EM LITRO DOS POSTOS DE COMBUSTÍVEL DA ROTA 3	60
TABELA 4.4	CAPACIDADE EM LITRO DE CADA COMPARTIMENTO	60
TABELA 4.5	PARÂMETROS DO VEÍCULO UTILIZADO (VASANT FABRICATORS E LPG GAS TANKER TRUCK)	60
TABELA 4.6	RESULTADOS DA MAXIMIZAÇÃO DA QUANTIDADE DE COMBUSTÍVEL ENTREGUE	63
TABELA 4.7	TEMPOS DE PROCESSAMENTO	66

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO	3
1.1.1	<i>Consumo de combustíveis em Portugal</i>	3
1.1.2	<i>Distribuição de combustível</i>	5
1.1.3	<i>Tipos de veículos utilizados</i>	9
1.1.4	<i>Acidentes no transporte de matérias perigosas</i>	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.3	METODOLOGIA	13
1.4	ESTRUTURA DO RELATÓRIO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	PARTE TÉCNICA	17
2.1.1	<i>ADR</i>	17
2.1.1.1	TRANSPORTE DE GASOLINA	18
2.1.1.2	TRANSPORTE DE GASÓLEO	20
2.1.1.3	SINALIZAÇÃO	21
2.1.1.3.1	Placas-etiquetas	22
2.1.1.3.2	Painéis Laranja	23
2.1.1.4	DOCUMENTAÇÃO	24
2.1.2	<i>Pesos brutos máximos</i>	24
2.1.3	<i>Tempos de condução, interrupções e repouso</i>	26
2.2	PARTE CIENTÍFICA	27
2.2.1	<i>Tipos de problemas</i>	28
2.2.2	<i>Descrição dos problemas</i>	30
2.2.2.1	PARTICULARIDADES DE CADA PROBLEMA	30
3	DESENVOLVIMENTO	37
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	39
3.2	<i>Load Distribution Diagram</i>	40
3.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	50
4	TESTES COMPUTACIONAIS	57
4.1	INTRODUÇÃO	59
4.2	DESCRIÇÃO DAS INSTÂNCIAS UTILIZADAS	59
4.3	EXTENSÃO AO MODELO A DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO	62
4.3.1	<i>Maximizar quantidade entregue</i>	63
4.3.2	<i>Minimizar a distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga</i>	64
4.3.2.1	COMPARAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS CENTROS DE GRAVIDADE PARA AS DIFERENTES FUNÇÕES OBJETIVO	65
4.4	ANÁLISE DOS TEMPOS COMPUTACIONAIS	66

5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	67
5.1	CONCLUSÕES	69
5.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	70
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	71

INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodologia
- 1.4 Estrutura do relatório

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo, será redigida a introdução do tema em que se baseou esta Dissertação. Primeiramente será apresentado o enquadramento sobre o tema, logo após serão definidos os objetivos do trabalho, seguidamente haverá uma explicação quanto às fases do trabalho e por fim será explicada a organização da Dissertação.

1.1 Enquadramento

1.1.1 Consumo de combustíveis em Portugal

De forma a manter a circulação que permite à sociedade as suas determinadas funções é necessário o abastecimento dos postos de combustível e seus derivados. De toda a energia consumida em Portugal em 2020, 30.85% é dedicada ao transporte rodoviário (Figura 1.1), tendo um peso enorme na economia do país e na vida de todos os residentes, quer direta ou indiretamente.

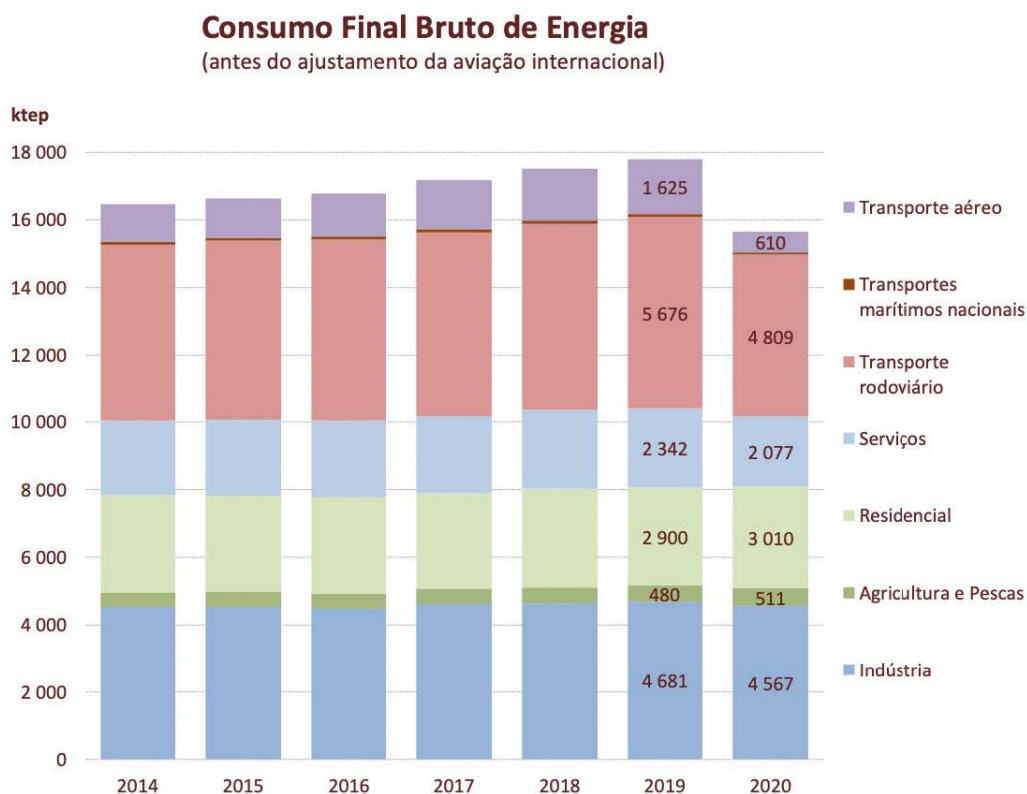


Figura 1.1 – Consumo Bruto de Energia em Portugal (DGEG, 2021)

Os combustíveis fósseis representam a maior fatia da energia utilizada para o transporte rodoviário. Apesar dos incentivos à compra de automóveis elétricos, Portugal continua a ter um parque automóvel envelhecido que depende, principalmente, da gasolina e do gasóleo. O consumo de combustíveis fósseis teve uma tendência crescente desde a década de 70 até o novo milénio (Figura 1.2). Desde então, a tendência é ligeiramente negativa, isto dado ao custo elevado de manutenção de veículos pessoais, acessibilidade das redes de transportes públicos, entre outros. Entre 2008 e 2010 vimos uma grande descida no consumo devido à crise económica no país e em 2020 vimos de novo um enorme decréscimo no consumo, desta vez devido à pandemia e introdução do teletrabalho, o que diminuiu as deslocações, e por sua vez, o consumo de combustíveis fósseis.

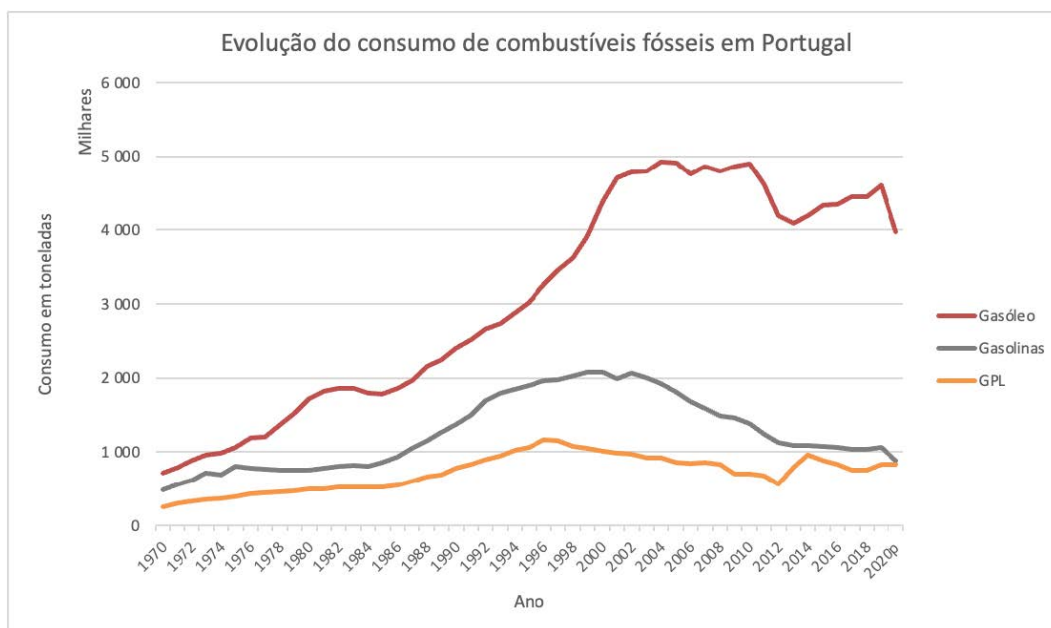


Figura 1.2 – Evolução do Consumo de Combustíveis Fósseis em Portugal (DGEG, 2021)

O gráfico acima resulta nos valores da Tabela 1.1:

Tabela 1.1 – Quantidade de gasolina e gasóleo vendidos em 2020 (DGEG, 2021)

Combustível	Vendas em toneladas em 2020
Gasolinas	883 907
Gasóleos	3 978 224
Total	4 862 131

1.1.2 Distribuição de combustível

Até acabar no depósito de um automóvel, os combustíveis passam por várias fases: o aprovisionamento, a refinação, a parte logística e, por fim, o retalho (Figura 1.3) Dentro da logística estão 3 fases: a expedição, a armazenagem e a distribuição.



Figura 1.3 – Fases do caminho percorrido pelos combustíveis (ERSE, 2021)

As 4 grandes fases são realizadas por diversas empresas ligadas ao setor dos combustíveis, visível na Figura 1.4. A Galp, por exemplo, está presente em todas as fases e tem um enorme peso pelas suas infraestruturas espalhadas por todo o país, assim como a única refinaria ativa em Portugal.



Figura 1.4 – Empresas ligadas às diversas fases (ERSE, 2021)

Tudo começa quando o crude é importado para o nosso país. Este produto é recebido no único estabelecimento apropriado à sua refinação em Portugal, a refinaria de Sines. Até ao ano 2021 estavam presentes em território nacional duas refinarias, a de Sines e a de Matosinhos, sendo esta segunda encerrada após a Galp descontinuar as suas operações neste local (ERSE, 2021). A refinação consiste no aquecimento do petróleo bruto. Este aumento de temperatura ocorre numa coluna e existem saídas à medida que a altura da coluna aumenta. Isto permite que os produtos de menor densidade e menor ponto de ebulição cheguem ao ponto mais alto da coluna, sendo

este produto, normalmente, o gás de petróleo. A refinação gera uma vasta quantidade de substâncias. Observando a Figura 1.5, vemos que em Portugal produzem-se enormes quantidades de produtos finais (1 barril equivale a aproximadamente 159 litros).

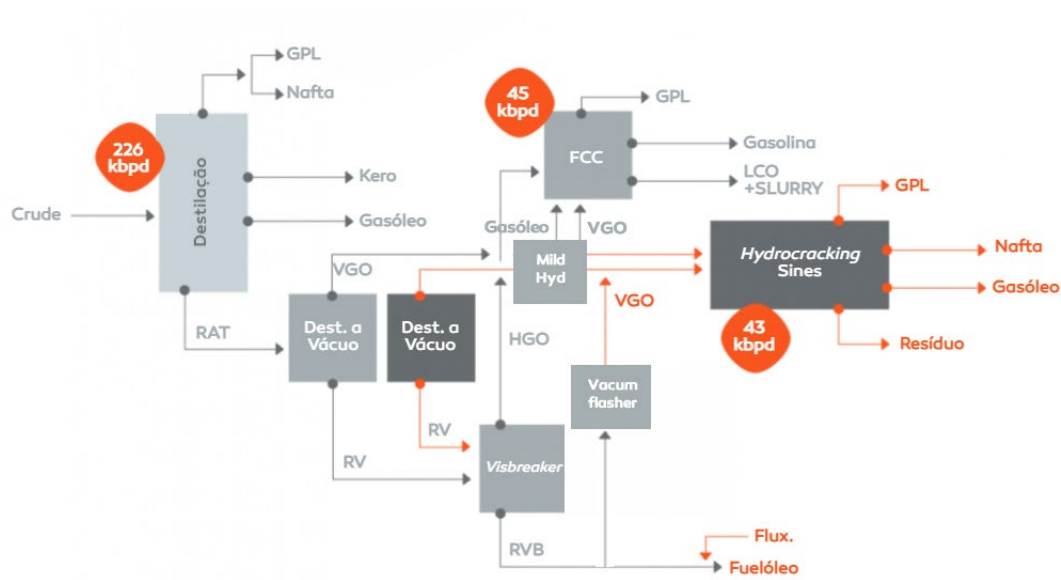


Figura 1.5 – Quantidade de produtos finais produzidos na refinaria de Sines (Galp Portugal)

Após a refinação na central de Sines, alguns produtos são expedidos por via marítima ou rodoviária. Uma grande parte dos produtos segue os oleodutos pertencentes à Companhia Logística de Combustíveis (CLC), que se estendem de Sines até Aveiras de Cima, conforme a Figura 1.6.



Figura 1.6 – Oleodutos da CLC (Companhia Logística de Combustíveis)

Os oleodutos, construídos em 1996, têm 147 km de comprimento e transportam seis produtos petrolíferos sequencialmente. Esta infraestrutura e logística é contro-

lada a partir de uma sala de controlo em Aveiras de Cima. A tubagem consegue transportar até 4 milhões de toneladas de combustível por ano.

Esta expedição leva os produtos até parques de armazenamento, onde podem ser feitas as misturas de biocombustíveis com os produtos saídos da refinaria. Posteriormente, estes parques carregam camiões-cisterna nos postos de carga devidamente instalados, e começa o processo de distribuição.

A distribuição de combustível em Portugal é realizada para os 2 grandes setores: indústria e retalho. Quanto à indústria, por exemplo, gerentes de grandes empresas privadas negociam contratos com os distribuidores, encomendando uma quantidade fixa num determinado intervalo de tempo. As bombas de gasolina low-cost acolhem este sistema, daí os preços ligeiramente mais baixos. Relativamente ao retalho, estamos no território das bombas de gasolina convencionais, estes postos de combustível têm tanques subterrâneos de uma determinada capacidade e encomenda ao distribuidor quantidades variáveis que dependem do volume de vendas nesse mesmo posto.

Um posto de combustível, de forma geral, vende 4 tipos de combustível principalmente: gasolina 95 normal, gasolina 95 aditivada, gasóleo normal e gasóleo aditivado. O gasóleo como um todo reflete cerca de dois terços do volume de vendas dos postos de combustível, e dentro deste grupo do gasóleo, o gasóleo aditivado reflete um terço do total de vendas.

Os postos de combustível, para este caso introduzido anteriormente, instalam tanques de armazenamento subterrâneos para cada um dos combustíveis vendidos, que neste caso seriam 4. Dentro destes 4 tanques, o tanque afetado ao gasóleo, normalmente, é o de maior capacidade, visto que o consumo do gasóleo é o mais alto entre todos os combustíveis para uso rodoviário. As encomendas dos distribuidores para os postos de combustível são realizadas e num espaço de 2/3 dias úteis são recebidas pelo posto. Todas as encomendas são comandadas pelo produto de maior volume de vendas, ou seja, o gasóleo. Os restantes produtos são entregues conforme a respetiva proporcionalidade de vendas entre os mesmos.

Os veículos afetados ao transporte dos combustíveis estão divididos em 5 ou 7 compartimentos (na generalidade), que permitem realizar uma gestão de encomendas adequada aos mais diversos postos espalhados por todo o território nacional. Os veículos mais utilizados em Portugal para este tipo de serviço de distribuição são camiões-cisterna de peso bruto igual a 40 toneladas (de 4 ou mais eixos), que corresponde a cerca de 33.00 m³ de carga líquida.

A distribuição tem como prioridade postos de combustível a maior distância do ponto de carga, pois o o preço de distribuição é acordado por km e não por volume. O camião-cisterna sai do local de carga sempre cheio, pois não é economicamente viável a realização de viagens com cargas inferiores.

Por fim, chega o combustível ao consumidor, quer seja este da área da indústria ou do retalho. Em 2019, estavam registados em Portugal Continental 3068 postos de

combustível. Para a grande maioria destes postos os combustíveis são transportados por caminhões-cisterna.

1.1.3 Tipos de veículos utilizados

Um veículo cisterna com diversos compartimentos tem a possibilidade de transportar várias substâncias ao mesmo tempo, o que reduz custos de transporte ao minimizar o número total de viagens realizadas. Tanto o posto de combustível como o distribuidor beneficiam das vantagens das cisternas multi-compartimento.

Uma cisterna com apenas um compartimento de volume igual a toda a cisterna traz algumas desvantagens. A substância líquida balança ao acompanhar as mudanças de direção do veículo trator, o que pode tornar-se perigoso quando estamos a transportar cargas na ordem das dezenas de toneladas, visto que o centro de massa varia drasticamente. Isto resulta em variações bruscas da carga dos eixos, o que pode causar instabilidade lateral (causadora de capotamento).

Na Figura 1.7 são visíveis as diferenças entre um veículo de compartimento singular e um veículo multi-compartimento.

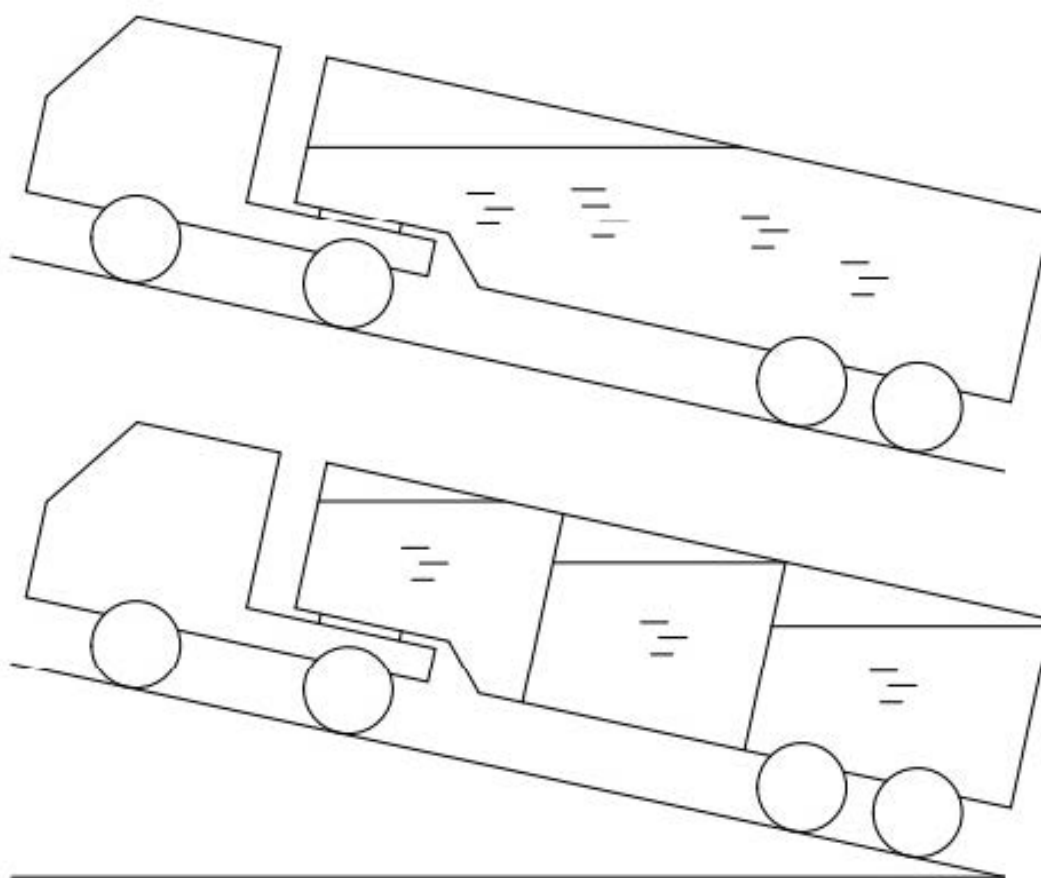


Figura 1.7 – Configurações relativamente ao número de compartimentos (Anster Trailers)

Ao dividir a cisterna em compartimentos, as transferências de carga tornam-se

relativamente menores e tornam a cisterna muito mais estável.

Para além de divisórias completamente seladas entre compartimentos, grande parte dos construtores inclui também placas longitudinais que limitam as transferências bruscas de carga lateralmente, visível na Figura 1.8.

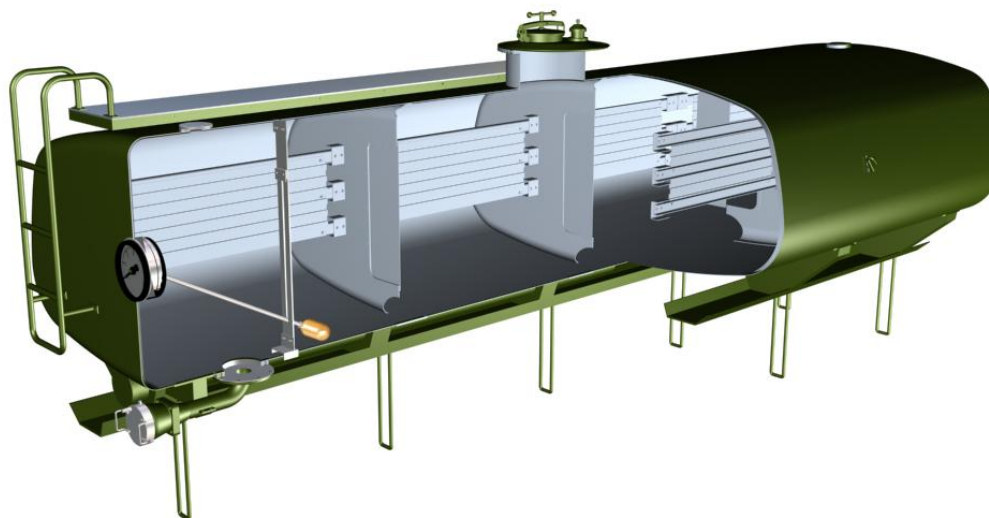


Figura 1.8 – Placas longitudinais das cisternas (Anster Trailers)

A carga dos vários compartimentos das cisternas (Figura 1.9) pode ser realizada pela comporta superior (*Top Loading*) ou por válvulas instaladas na parte inferior dos compartimentos (*Bottom Loading*). O *Top Loading* é um método mais antigo, que é mais perigoso que o outro método. O combustível despejado na cisterna emite vapores que sobem pelo mesmo compartimento, tornando-se perigoso no caso de haver alguma fonte de faísca por perto e também pela ingestão dos gases por parte dos operadores. Este método é lento relativamente ao *Bottom Loading*, mas não exige bombas tão sofisticadas nos cais de carga. O *Bottom Loading* é recomendado para todos os tipos de combustíveis, visto ser muito mais seguro que o método anterior. Devido ao avanço do rendimento e eficiência das bombas nas últimas décadas tornou-se no método mais rápido. Os gases são evacuados por um compartimento superior e seguem por condutas de volta para os tanques de origem, não causam nenhum distúrbio aos operadores nem ocorrem riscos de incêndio/explosão.

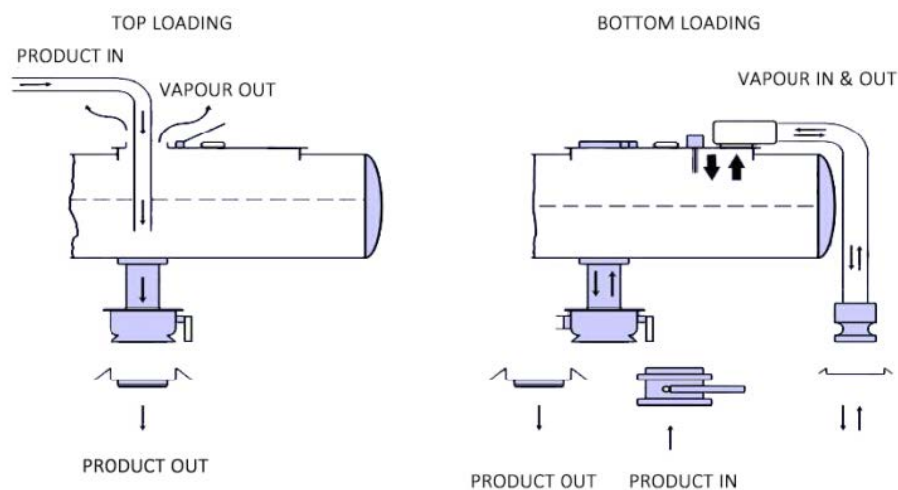


Figura 1.9 – Métodos de carga da cisterna (Anster Trailers)

Ao carregar a cisterna deve haver sempre atenção ao coeficiente de expansão da matéria, os limites de carga exigidos pelo país em questão, a massa da matéria perigosa e a temperatura da carga.

A descarga nos postos de combustível é realizada através de válvulas localizadas numa das laterais do veículo, visíveis na Figura 1.10. São dimensionadas de forma que, independentemente do fluxo mantenham sempre pressões baixas. Estas válvulas têm também características que permitem que o derrame seja mínimo quando são acopladas ou removidas as mangueiras necessárias para a transferência de matéria dos compartimentos da cisterna para os tanques do posto de combustível.



Figura 1.10 – Válvulas de descarga da cisterna (Anster Trailers)

A cisterna possui também válvulas de segurança. Estas válvulas têm como propósito evitar que a pressão deixe de estar a um nível seguro. Se a pressão atingir 1,1 vezes a pressão para qual a cisterna for dimensionada esta válvula aciona e liberta gases provenientes do combustível para a atmosfera. A válvula volta a fechar quando a pressão atinge 0,8 vezes a pressão para qual a cisterna for dimensionada.

1.1.4 *Acidentes no transporte de matérias perigosas*

Através de uma amostra de 708 acidentes rodoviários com veículos cisterna de transporte de matérias perigosas na China desde 2004 até 2011, a causa predominante dos acidentes foi capotamento com 29,10% do valor total. Seguidamente, saídas de estrada correspondem a 16,67% e colisões entre veículos 13,28%. A probabilidade de haver algum tipo de derrame de substâncias perigosas foi de 75,00%. As duas maiores razões pelas quais os acidentes ocorreram foram erro humano (73,80%) e defeitos de fabrico do veículo (19,60%) (Shen et al., 2014). A possibilidade de acidentes catastróficos está sempre presente, o que levou alguns investigadores a desenvolver métodos que tenham em conta as rotas dos veículos e se os mesmos circulam próximo a monumentos de grande importância ou hospitais, por exemplo (L. Liu et al., 2021; Ma et al., 2012; Mahmoudabadi et al., 2016; Masoud et al., 2020; Parsafard et al., 2015). Assim, estas rotas são rejeitadas e formuladas outras mais seguras.

1.2 *Objetivos*

O objetivo da parte inicial do trabalho é a exposição da legislação envolvente à circulação de veículos pesados, circulação de veículos transportadores de matérias perigosas e tempos máximos de condução e pausas, sendo estas 3 grandes questões a parte técnica da revisão bibliográfica. Para a parte científica, serão analisados uma série de artigos que abordem este problema de distribuição de combustível. Serão comparadas as metodologias e particularidades de cada um e esta segunda parte resultará numa tabela resumo que compara uma seleção de trabalhos científicos realizados até ao momento.

No desenvolvimento será concebido um modelo matemático que seja capaz de efetuar a distribuição logística do combustível dentro da cisterna de um veículo de transporte de combustível. Será tido em conta valores máximos exigidos por legislação assim como valores recomendados por fabricantes com o intuito de garantir a segurança da carga ao longo da distribuição. Outro factor restritivo ao problema será a construção de um *Load Distribution Diagram*, ferramenta útil à garantia da segurança da carga. Em todas as paragens da viagem de distribuição de combustível será assegurada a segurança através deste diagrama.

1.3 Metodologia

A informação introdutória foi obtida a partir de uma conversa com o Sr. Engenheiro Henrique Guilherme De Oliveira Correia, que durante muitos anos esteve envolvido na distribuição de combustíveis em Portugal, assim como a análise de alguns relatórios energéticos provenientes da DGEG e da ERSE. Foram também utilizados alguns motores de busca de artigos científicos: Google Scholar, Science Direct, entre outros. A escrita do relatório foi toda elaborada utilizando \LaTeX e criação de tabelas no Microsoft Excel. Quanto ao desenvolvimento do modelo matemático e posteriores testes computacionais foi utilizado o software *IBM CPLEX ILOG*.

1.4 Estrutura do relatório

Após o enquadramento na matéria da distribuição de combustíveis, a revisão bibliográfica será dividida em duas grandes partes: a parte técnica e a parte científica. Na parte técnica serão abordados temas relacionados com os veículos pesados de mercadorias em si, e o que estes necessitam de forma a circular em segurança em território português. Esta primeira parte aborda o ADR (regulamento europeu que define as regras para a distribuição rodoviária de matérias perigosas), os pesos máximos admissíveis destes veículos e os tempos de descanso dos condutores. Na parte científica será realizada a pesquisa dos modelos matemáticos, heurísticas e algoritmos utilizados para a resolução do problema de distribuição de combustível.

O seguinte capítulo será o de desenvolvimento. Começará pela descrição do problema onde será explicado o problema e qual o objetivo da resolução. De seguida, será introduzido o conceito de *Load Distribution Diagram (LDD)*, para que serve e o que representa. Na terceira e última parte teremos a abordagem que foi tomada para chegar ao modelo matemático que resolverá este problema de Programação Linear Inteira Mista, a explicação de todos os parâmetros e variáveis de decisão, esclarecimento de cada uma das restrições e como será aplicado o modelo ao problema em questão.

De forma a apresentar e discutir os resultados obtidos, daremos início ao quarto capítulo "Testes Computacionais". É introduzido o capítulo e descrito o objetivo do mesmo, assim como a descrição da ferramenta utilizada. Logo, são apresentadas as instâncias utilizadas, qual a sua origem e como serão aplicadas no presente trabalho. Neste sub-capítulo são apresentados já os primeiros resultados do modelo. Sucede-se a extensão ao modelo a diferentes funções objetivo, sub-capítulo que explica como o mesmo modelo pode ser utilizado de forma a alcançar diversos objetivos através da alteração da função objetivo. Ainda comparamos os resultados obtidos anteriormente e é realizada uma análise crítica do que foi obtido ao longo dos testes. Por fim, será apresentado o comportamento do modelo matemático.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Parte Técnica

2.2 Parte científica

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste documento dividir-se-á em duas partes. Uma parte técnica, que se debruçará sobre a legislação praticada em Portugal quanto ao transporte rodoviário de matérias perigosas (neste caso combustível), estudos sobre massas máximas permitidas por lei e estabilidade lateral de veículos-cisterna, como é efetuada a distribuição de combustível, quais as restrições para os condutores destes veículos, entre outros. E a parte científica, que consiste na exploração dos modelos matemáticos exatos, heurísticas e algoritmos que permitem a resolução deste tipo de problemas.

2.1 Parte Técnica

De forma a resolver qualquer tipo de problema de transporte de combustível, é necessária ter em atenção a segurança do transporte (Hamdi et al., 2014; Holeczek, 2019; Yilmaz et al., 2016). A parte técnica da revisão bibliográfica assegura isso, tendo por base a legislação imposta em Portugal.

2.1.1 ADR

De forma a compreender como é realizado o transporte e reabastecimento de combustível em Portugal é necessária a introdução do Acordo Europeu relativo ao Transporte Internacional de Matérias Perigosas por Estrada (ADR) (*Decreto Lei no 19-A/2014 de 7 de fevereiro do Ministério da Economia*, 2014). Todo este ponto segue o que está descrito no Decreto Lei anteriormente indicado. Como o nome indica, este documento regulamenta todo o transporte de matérias perigosas através da via rodoviária, está dividido em 9 partes e cada uma delas divide-se em capítulos. As partes 1 a 7 apresentam restrições quanto ao tipo de mercadoria, assim como ao seu acondicionamento e etiquetagem. Nas duas últimas partes (8 e 9) são apresentadas as prescrições respeitantes à construção, ao equipamento e à exploração de veículos adequados ao transporte de matérias perigosas. Viu-se necessidade de criação de legislação específica ao transporte de matérias perigosas por estrada devido à sua acrescida complexidade, de forma a aumentar a segurança na via pública.

2.1.1.1 Transporte de Gasolina

Utilizando o ADR, foi realizada a colheita de informação indispensável, apresentada na Tabela 2.1, para a realização do transporte e aprovisionamento de gasolina em veículos-cisterna.

Tabela 2.1 – Informação necessária para a distribuição de gasolina, Fonte: ADR

Código ONU	1203
Classe	3
Código de Classe	F1
Grupo de embalagem	II
Etiquetas	3
Disposições Especiais	243 e 534
Instruções para cisternas móveis	T4
Disposições especiais	TP1
Código Cisterna ADR	LGBF
Disposições especiais	TU9
Veículo p/ transporte de cisterna	FL
Categoria de transporte	2 (D/E)
Operação	S2 S20
Nº de identificação de perigo	33

O código ONU para esta substância é 1203 e pertence à Classe 3 (Líquidos inflamáveis). O seu código de classe é F1, que significa que se trata de um líquido inflamável com um ponto de inflamação inferior ou igual a 60° C. O grupo de embalagem II indica que se trata de uma matéria medianamente perigosa e o número de etiqueta (3) indica o número de etiquetas sinalizadoras presentes no ato do transporte ou a sua localização. As disposições especiais 243 e 534 indicam, respectivamente, que se trata de gasolina destinada à propulsão de motores de automóveis e que deve ser considerada como matéria com pressão a vapor a vapor, a 50° C, não excedente a 110 kPa (1,10 bar). Quanto a instruções para cisternas móveis, é atribuída à gasolina a categoria T4 que define aos testes da cisterna de transporte uma pressão mínima de ensaio e também a espessura mínima do reservatório. É também de salientar as disposições especiais quanto ao tópico anterior, que contam com a categoria TP1 (fórmula da taxa máxima de enchimento da cisterna móvel). A equação 2.1 define a taxa máxima de enchimento, em percentagem.

$$\text{Taxa de enchimento} = \frac{97}{1 + \alpha \times (tr - tf)} \quad (2.1)$$

Nesta equação, α representa o coeficiente médio de dilatação cúbica do líquido entre a temperatura média do líquido no momento de enchimento (tf) e a temperatura média máxima da carga durante o transporte (tr) (em °C). Em condições

normais, a temperatura média máxima da carga durante o transporte é fixada a 50°C. Este coeficiente pode ser calculado através da equação 2.2.

$$\alpha = \frac{d15 - d50}{35 \times d50} \quad (2.2)$$

Sendo d15 e d50 as densidades relativas da substância a 15°C e 50°C, respetivamente. Seguidamente, o código de cisterna ADR atribuído caracteriza-se como LGBF (Tabela 2.2), tendo como disposições especiais TU9.

Tabela 2.2 – Caracterização de cisterna do tipo LGBF, Fonte: ADR

L	Matérias no estado líquido
G	Pressão mínima de ensaio (6.8.2.1.14)
B	Abertura de enchimento e descarga por baixos com 3 fechos
F	Cisterna com dispositivo de respiro, dispositivo de proteção contra propagação de chama ou resistente à pressão do choque gerado por explosão

O veículo utilizado para o transporte da cisterna deverá ser do tipo FL, que está descrito no ADR como:

- Veículo destinado ao transporte de líquidos com um ponto de inflamação não superior a 60° C em cisternas fixas ou desmontáveis com uma capacidade superior a 1.00 m³ ou em contentores-cisterna ou cisterna móveis com uma capacidade individual superior a 3.00 m³; ou
- Veículo destinado ao transporte de gases inflamáveis em cisternas fixas ou desmontáveis com uma capacidade superior a 1.00 m³, ou em contentores-cisterna, cisternas móveis ou CGEM com uma capacidade individual superior a 3.00 m³; ou
- Veículo-bateria com capacidade superior a 1.00 m³ destinado ao transporte de gases inflamáveis; ou
- Veículo destinado ao transporte ed peróxido e hidrogénio em cisternas fixas ou desmontáveis com uma capacidade superior a 1.00 m³ ou em contentores-cisterna ou cisternas móveis com uma capacidade individual superior a 3.00 m³.

A categoria de transporte 2 (D/E) dá-nos indicações quanto à quantidade máxima de transporte (333 litros) e à circulação em túneis, que, neste caso significa que um veículo que transporte uma cisterna com gasolina não poderá circular em túneis de categoria D e E. A restrição de operação S2 descreve algumas prescrições adicionais quanto a aparelhos portáteis de iluminação, ao funcionamento de aparelhos de aquecimento a combustão durante a carga ou descarga e medidas a tomar de forma

a evitar a acumulação de cargas electrostáticas. A restrição S20 descreve como deve ser realizada vigilância num veículo que transporte 10000 kg ou 3000 litros de combustível. Por último, o número de identificação de perigo 33 indica que se trata de uma matéria líquida muito inflamável (ponto de inflamação inferior a 23° C) e este número deve aparecer nos painéis laranja.

2.1.1.2 Transporte de Gasóleo

De forma a descrever em que condições é transportado o gasóleo, foi feita uma recolha de informação no ADR igual à feita anteriormente para o caso da gasolina, que pode ser resumida à informação presente na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Informação necessária para a distribuição de gasóleo, Fonte: ADR

Código ONU	1202
Classe	3
Código de Classe	F1
Grupo de embalagem	III
Etiquetas	3
Disposições Especiais	640K e 644
Intruções para cisternas móveis	T2
Disposições espaciais	TP1
Código Cisterna ADR	LGBF
Disposições especiais	-
Veículo p/ transporte de cisterna	FL
Categoria de transporte	3 (D/E)
Operação	S2
Nº de identificação de perigo	30

O código ONU altera-se, sendo esta uma outra matéria, para 1202. É uma substância de classe 3 (líquidos inflamáveis) e com um código de classe F1 (líquido inflamável com um ponto de inflamação inferior ou igual a 60° C). O grupo de embalagem é III, ou seja, é uma substância levemente perigosa. Esta matéria, quando transportada, tem de ser acompanhada de 3 etiquetas. O transporte de gasóleo implica duas restrições especiais, a 640K que confere a presença do texto “Disposição especial 640K” no documento de transporte e a 644 que admite ou rejeita o transporte conforme algumas características químicas da substância. As instruções para cisternas móveis de cariz T2 indicam a pressão mínima do ensaio aplicável, espessura mínima do reservatório, características dos dispositivos de descompressão e o número de orifícios na base da cisterna. Estas instruções são menos restritas para o transporte de gasóleo comparativamente com o transporte de gasolina. É também de salientar a disposição especial quanto ao tópico anterior, que se define como TP1 (fórmula da taxa de enchimento da cisterna). O código de cisterna é LGBF, que

é o mesmo descrito acima para a gasolina, desta vez sem disposições especiais. O veículo para o transporte de cisternas é do tipo FL, como o para o transporte de gasolina. A categoria de transporte 3 (D/E) indica-nos que a quantidade máxima de transporte em litros é de 1000 e que um veículo cisterna que transporte gasóleo está proibido de circular em túneis do tipo D e E. O próximo ponto a ser analisado é o código de operação S2, este indica algumas prescrições adicionais quanto a aparelhos de iluminação, funcionamento de aparelhos de aquecimento a combustão durante a carga ou descarga ou medidas a tomar de forma a evitar a acumulação de cargas electrostáticas. Por fim, temos a indicação do número de identificação de perigo 30 que o gasóleo se trata de uma matéria líquida inflamável (com ponto de inflamação de 23 °C a 60 °C).

2.1.1.3 Sinalização

Para o transporte de matérias perigosas são necessários dois tipos de sinalização: placas-etiquetas (serve o público) e painel laranja (serve o pessoal especializado/de intervenção). Na Figura 2.1 a placa-etiqueta está na traseira à direita da cisterna e o painel laranja está localizado no canto inferior esquerdo da cisterna, ambas localizadas em conformidade com o que é descrito na legislação aplicável.



Figura 2.1 – Veículo Cisterna a transportar gasolina (Intervir.pt)

2.1.1.3.1 Placas-etiquetas

As placas-etiquetas para transporte de combustível devem ter a forma de um losango com, no mínimo, 25 cm de lado (Figura 2.2). Devem também apresentar as cores e informações apresentadas na Figura 2.3.

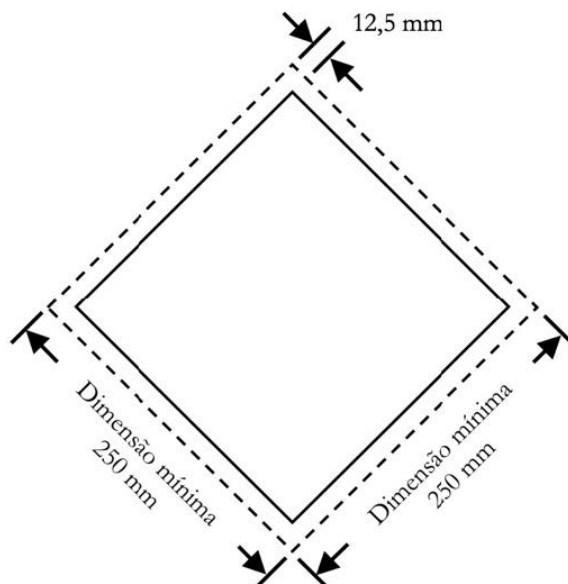


Figura 2.2 – Dimensões mínimas obrigatórias das placas-etiquetas, Fonte: ADR



Figura 2.3 – Cores das placas-etiquetas para substâncias de classe 3, Fonte: ADR

A legislação explica que estas placas-etiquetas devem ser colocadas nas paredes exteriores das cisternas e a sua quantidade deve ser de 3 unidades no caso de estarem contidos no reservatório gasolina ou gasóleo. Estas placas devem ser aplicadas sobre um fundo que apresente contraste ou que tenham o seu perímetro traçado continuamente ou a tracejado. As placas têm de ser resistentes a intempéries e têm de se apresentar fixas durante todo o transporte de forma a garantir a sua correta sinalização.

É também indicado que as placas-etiquetas têm de ser aplicadas dos dois lados e nas duas extremidades do contentor-cisterna. Quando forem transportadas mais

do que uma mercadoria perigosa na mesma cisterna, as placas-etiquetas devem ser aplicadas dos dois lados, em correspondência à matéria no reservatório, assim como nas duas extremidades. Se as duas matérias perigosas tiverem a mesma placa-etiqueta podem ser colocadas apenas uma em cada lado e uma em cada extremidade no total.

2.1.1.3.2 Painéis Laranja

Todos os veículos que transportem matérias perigosas devem apresentar, num plano vertical, dois painéis retangulares de cor laranja com as dimensões da Figura 2.4. Estes painéis devem estar bem visíveis e fixos, um na frente e outro na retaguarda da unidade de transporte, perpendicularmente ao eixo longitudinal do veículo.

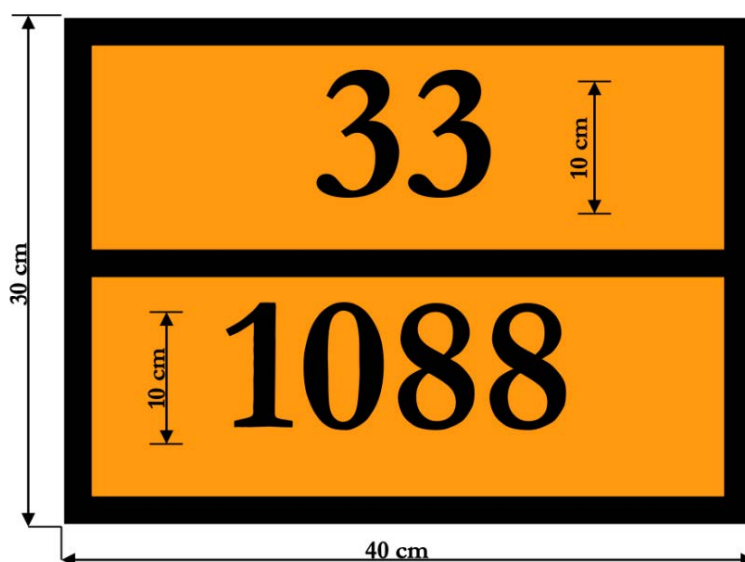


Figura 2.4 – Dimensões dos painéis laranja, Fonte: ADR

Os painéis laranja são constituídos por dois números. Os, normalmente 2 ou 3, algarismos que se encontram na parte superior da placa são provenientes do número de identificação de perigo. No caso da gasolina será apresentado o número 33 (matéria líquida muito inflamável) e no caso do gasóleo será apresentado o número 30 (matéria líquida inflamável). O número inferior é referente ao N^o ONU da substância armazenada na cisterna à que o painel está afixado.

No caso do reboque com mercadorias perigosas ser separado do seu veículo trator durante o transporte, deve manter-se fixado um painel laranja na retaguarda do reboque.

Quando são transportados, em simultâneo, no mesmo veículo matérias com os N^o ONU 1202 e 1203 os painéis laranjas serão constituídos pelo número de identificação de perigo e número ONU da matéria perigosa mais perigosa, ou seja, com o ponto de inflamação mais baixo, que neste caso seria a gasolina (N^o ONU 1203).

2.1.1.4 Documentação

O documento de transporte pode ser o exigido por outras regulamentações de transporte, o exigido pela lei fiscal de forma a controlar o IVA ou a guia de transporte para transportadores por conta de outrem. Este documento terá de conter nome e endereço do expedidor, nome e endereço do destinatário e designação de cada matéria perigosa em transporte (para o caso da gasolina: UN 1203 GASOLINA 3 GE II (D/E)).

Ao efetuar a distribuição, também deve estar presente um certificado de carregamento do contentor ou do veículo.

Para além dos dois documentos descritos anteriormente, o distribuidor deve também transportar consigo um conjunto de instruções escritas. As instruções escritas devem conter todas as medidas a tomar em caso de emergência ou acidente, indicações suplementares para os membros da tripulação sobre as características do perigo e equipamentos de proteção a utilizar.

Durante, pelo menos, três meses, o expedidor e o transportador devem conservar cópias dos documentos de transporte de mercadorias perigosas.

2.1.2 Pesos brutos máximos

De forma a circular nas estradas portuguesas em segurança e conformidade com a lei, é necessário ter em atenção os pesos brutos máximos exigidos pela legislação (*Decreto Lei no 132/2017 de 11 de outubro de Planeamento e das Infraestruturas*, 2017). O peso bruto máximo depende do veículo se tratar de pesado de passageiros, pesado de mercadorias, conjunto trator-semirreboque ou conjunto veículo e reboque. Dentro destas categorias a restrição é o número de eixos do veículo ou reboque.

Tendo isto em conta, os pesos brutos máximos para circulação em via pública (estando os veículos tecnicamente preparados para este efeito) são os seguintes:

1. Veículos a motor, exceto pesados de passageiros:
 - (a) Dois eixos – 19 toneladas;
 - (b) Três eixos – 26 toneladas;
 - (c) Quatro ou mais eixos – 32 toneladas.
2. Conjunto veículo a motor – semirreboque:
 - (a) Três eixos – 29 toneladas;
 - (b) Quatro eixos – 38 toneladas;
 - (c) Cinco ou mais eixos – 44 toneladas.
3. Conjunto veículo a motor – reboque:

- (a) Três eixos – 29 toneladas;
- (b) Quatro eixos – 37 toneladas;
- (c) Cinco ou mais eixos – 44 toneladas.

4. Reboques:

- (a) Um eixo – 10 toneladas;
- (b) Dois eixos – 18 toneladas;
- (c) Três ou mais eixos – 24 toneladas.

À exceção de reboques agrícolas, o peso bruto do reboque não pode ser superior a uma vez e meia o peso bruto do veículo trator.

No mesmo Decreto-Lei é ainda indicado qual o peso bruto máximo por eixo:

1. Eixo simples:

- (a) Frente – 7,5 toneladas;
- (b) Não motor – 10 toneladas;
- (c) Motor – 12 toneladas.

2. Eixo duplo motor e não motor (os pesos brutos máximos relacionam-se com a distância entre eixos – d):

- (a) Se d for inferior a 1 metro – 12 toneladas;
- (b) Se d for de 1 metro a 1,29 metros – 17 toneladas;
- (c) Se d for de 1,3 metros a 1,79 metros – 19 toneladas;
- (d) Se d for igual ou superior a 1,8 metros – 20 toneladas.

3. Eixo triplo motor e não motor (os pesos brutos máximos relacionam-se com a distância entre os dois eixos extremos – D):

- (a) Se D for inferior a 2,6 metros – 21 toneladas;
- (b) Se D for igual ou superior a 2,6 metros – 24 toneladas.

Caso seja necessário importar um veículo de transporte de peso bruto superior ao indicado anteriormente é possível proceder à homologação deste mesmo veículo através do *Regulamento (UE) 2018/858 do Parlamento Europeu* (2018). Este regulamento é relativo à homologação e à fiscalização do mercado dos veículos a motor e seus reboques, e dos sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a estes mesmos veículos.

Para além dos pesos brutos, veículos das categorias N2 e N3 não devem exceder o comprimento máximo de 12 metros, largura máxima de 2,55 metros e altura máxima de 4 metros.

Os reboques e semirreboques de categoria O4 (peso bruto máximo acima das 10 toneladas) devem, também, estar sujeitos a algumas restrições de dimensões:

1. Comprimento máximo:
 - (a) Reboque – 12 metros incluindo lança de tração;;
 - (b) Semirreboque – 12 metros mais a consola dianteira (que pode ter raio máximo de 2,04 metros).
2. Largura máxima: 2,55 metros;
3. Altura máxima: 4 metros.

2.1.3 Tempos de condução, interrupções e repouso

De forma a uniformizar os períodos de condução e períodos de interrupções e repousos, em 1985, o Regulamento CEE N°3820/85 e o Regulamento CEE N°3821/85, de 31 e dezembro e 20 de dezembro, respetivamente, foram adotados por todos os países membros da comunidade europeia. Estes regulamentos apelam à segurança na via pública, visto que a fadiga é uma das principais causas de acidentes rodoviários. De forma a combater a mesma, são impostos no regulamento tempos máximos de condução, quando devem ser feitas interrupções e quando devem ser realizados tempos de repouso, assim como a sua duração.

Este regulamento implica que:

- Existem repousos diários e repousos semanais;
- A duração de condução compreendida entre dois períodos de repouso diário ou entre um período de repouso diário e um semanal não deve ultrapassar 9 horas. Este período pode ser de até 10 horas duas vezes por semana;
- Após seis períodos diários de condução, o condutor deve realizar o seu repouso semanal;
- A duração total de condução não pode ultrapassar 90 horas por cada duas semanas consecutivas;
- Após 4 horas e meia de condução, o condutor terá de fazer uma pausa de 45 minutos, exceto se iniciar um período de repouso. Esta pausa pode ser trocada por pausas de, pelo menos, 15 minutos cada, intercaladas na duração da condução diária;
- Durante estas pausas, o condutor não pode efetuar qualquer outro trabalho;
- Estas pausas não devem ser consideradas repousos diários;

- A cada 24 horas, o condutor tem direito a um período de repouso diário de, pelo menos 11 horas consecutivas. Este período pode ser reduzido a um mínimo de 9 horas consecutivas três vezes por semana no máximo, desde que as horas de repouso em falta sejam repostas até ao final da atual semana;
- Nos dias de 11 horas de repouso consecutivas, este tempo pode ser gozado em dois ou três períodos separados durante o período de 24 horas. Um destes períodos tem de ser de, pelo menos, 8 horas consecutivas e neste caso, a duração mínima de repouso passa a ser de 12 horas;
- A cada semana, um dos períodos de repouso é prolongado para um total de 45 horas consecutivas (descanso semanal). Pode ser reduzido a 36 horas consecutivas se gozado no local de afetação habitual do veículo ou condutor, ou a um mínimo de 24 horas consecutivas se for gozado fora destes locais. Cada redução de descanso é compensada por um período de tempo equivalente antes do final da terceira semana, a seguir à semana em questão.
- Um período de repouso semanal que comece numa semana e se estenda a outra pode ser ligado a qualquer uma destas semanas;
- A todos os períodos de repouso provenientes de compensação diária ou semanal devem ser ligados a um outro período de repouso de, pelo menos, 8 horas e deve ser realizado, a pedido do condutor, no local de afetação habitual do veículo ou do condutor;
- O repouso diário pode ser realizado no veículo se este estiver equipado com beliche e não se encontre em movimento.

O controlo destes tempos é realizado pela atribuição de horários e utilização do tacógrafo. A empresa atribui um horário de serviço que cada condutor deve respeitar, num período mínimo que abranja a semana em curso, bem como a que lhe segue. Este horário deve ser assinado pelo chefe/delegado da empresa. De forma a registar as horas de trabalho, é utilizado o tacógrafo, que resulta num registo de serviço com todas as horas de conduções, horas de trabalho e horas de pausa/repouso. É um aparelho selado que não permite falsificação e garante assim ao empregador o cumprimento de horários por parte dos condutores. A empresa terá de conservar um registo de serviço durante um ano após o término do período abrangido. A empresa terá também de fornecer um extrato do registo aos condutores que o solicitarem.

2.2 Parte científica

Nesta secção do trabalho, é introduzida a parte científica da revisão bibliográfica. Serão abordados alguns modelos de problemas e serão comparados alguns artigos de modo a elucidar os problemas (e as suas diversas particularidades) que foram

resolvidos ao longo dos anos, relativamente ao problema do abastecimento de postos de combustível. Todos os termos relativos ao tipo de problema e heurísticas estão descritas no Anexo A.

2.2.1 Tipos de problemas

Os três principais tipos problemas estudados durante a revisão bibliográfica foram:

- *Travelling Salesman Problem* (TSP): É um problema que resolve a distribuição de um determinado produto para uma série de clientes. De forma a resolver o problema é necessária a visita de todos os clientes através de uma única rota e voltar ao posto inicial. O seu objetivo é encontrar o caminho mais curto/eficiente para encontrar uma rota ótima. Um TSP não tem capacidade limite dos veículos de distribuição (W.-Y. Liu et al., 2014);
- *Vehicle Routing Problem* (VRP): Um VRP requer que o veículo de transporte saia de um centro de distribuição e volte ao mesmo posto no fim da rota, que o veículo deve ser capaz de transportar a capacidade encomendada por cada cliente, que cada cliente seja visitado apenas uma vez por veículo e que a capacidade encomendada pelos clientes não exceda a capacidade limite do veículo (Baldacci et al., 2010). Ou seja, um VRP baseia-se no TSP, mas é limitado à capacidade do veículo, sendo esta finita. Na Figura 2.5 podemos observar a diferença entre um TSP e um VRP (W.-Y. Liu et al., 2014);

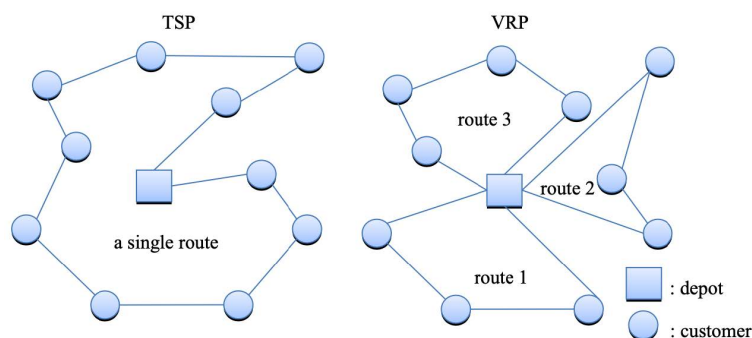


Figura 2.5 – Comparação visual entre um TSP e um VRP (W.-Y. Liu et al., 2014)

- *Inventory Routing Problem* (IRP): Este tipo de problema envolve a coordenação de dois grandes componentes da logística, a gestão de inventário e o roteamento de veículos. É necessária a distribuição de um produto proveniente de um único armazém para um número n de clientes ao longo de um intervalo de tempo fixo. Os clientes gastam os produtos a uma taxa constante e têm em stock um determinado nível de produtos. Para a distribuição é utilizada uma frota homogênea com uma capacidade fixa. O objetivo do problema é minimizar os custos de distribuição sem causar rotura de stock a nenhum cliente (Popović et al., 2011).

Destes geraram-se alguns problemas com outras particularidades, podemos assumi-los como problemas derivados dos acima:

- *Pollution Routing Problem (PRP)*: Extensão do clássico VRP. Este tipo de problema tem uma função objetivo mais abrangente e mais compreensiva devido à adição de restrições e custos associados à quantidade de gases de efeito de estufa emitidos, combustível consumido e tempos de viagem (Bektaş & Laporte, 2011);
- *Petrol Station Replenishment Problem (PSRP)*: É um problema derivado do VRP. Determina as rotas de menor custo quando a entrega é realizada por uma frota heterogénea, submetido a uma série de restrições. Neste tipo de problema os compartimentos da cisterna não estão equipados com um *flow meter* (equipamento que permite o controlo sobre a quantidade descarregada em cada compartimento) que implica o vazamento de cada compartimento na totalidade, ou seja, num compartimento não pode ser transportada matéria para mais do que um posto de combustível. Devido aos postos de combustível necessitarem, normalmente, de dois ou três produtos em cada visita, o número de postos de combustível visitados durante uma rota é raramente maior que dois (Febriandini et al., 2020);
- *Generalized Trip Packing Problem (GTPP)*: Um é um sub problema do PSRP. Este tipo de problema é definido pela distribuição através de uma frota heterogénea limitada que permite horas extra por parte dos condutores. A utilização de uma frota heterogénea permite que o lucro de cada viagem dependa do veículo utilizado e que algumas rotas não sejam possíveis com um determinado veículo devido às suas características. O objetivo principal é maximizar o lucro proveniente de operações, que resulta da soma do lucro de cada viagem menos o custo das horas extra utilizadas. O lucro de cada viagem é afetado pelo custo de operação variável (consumo de combustível e custo do condutor por hora) (Boctor et al., 2011).

A partir destes 6 tipos de problemas foram se adicionando algumas particularidades para chegar a todos os problemas abordados neste trabalho. Por exemplo, um MCVRP é um simples VRP onde é adicionada a nuance dos veículos de transporte apresentarem uma cisterna multi-compartimento. A diferença entre um veículo de compartimento único e multi-compartimento (Figura 2.6a e Figura 2.6b) é que a segunda configuração permite o transporte de múltiplos produtos, que permite que o veículo sirva as necessidades de mais clientes (Islam et al., 2015).

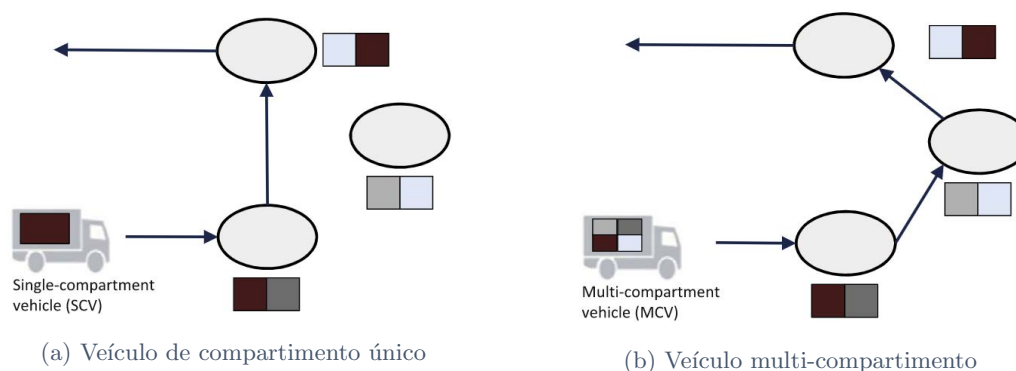


Figura 2.6 – Diferença entre configurações de compartimentos(Ostermeier & Hübner, 2018)

Outro exemplo é o PVRP, que introduz o factor periodicidade ao VRP. Isto faz com que seja possível resolver um problema que envolva mais do que um dia de distribuição, de forma a minimizar, no geral, os custos da distribuição, ao contrário do VRP clássico que é resolvido diariamente (Campbell & Wilson, 2014).

2.2.2 Descrição dos problemas

De forma cronológica serão descritos nesta parte do trabalho o trabalho de alguns autores sobre o problema da distribuição de combustível. Ao longo do texto estão descritas algumas particularidades dos problemas estudados e a forma como são abordados, quer métodos exatos como métodos heurísticos. Após a descrição de todos os problemas está apresentada uma tabela-resumo dos mesmos (Tabela 5).

2.2.2.1 Particularidades de cada problema

Brown & Graves (1981), estudou a distribuição de combustíveis da empresa americana Chevron USA. O problema abordado envolvia mais de 80 centros de distribuição, 300 veículos cisterna (frota limitada e heterogénea) e cerca de 2600 viagens por dia. Todas as encomendas para postos de combustível comprometem-se a encomendar veículos cisterna cheios. Todos os veículos cisterna teriam obrigatoriamente de sair cheios dos centros de distribuição. Outra característica deste problema é que cada viagem do veículo cisterna apenas serve um posto de combustível. Este problema não tinha em conta janelas temporais. O problema foi formulado através de *Integer Linear Programming* (ILP) e resolvido através da heurística *Minimum-Cost Flow Problem* (MCFP).

Poucos anos depois, Brown et al. (1987) descreveu um problema de distribuição de combustível de forma computadorizada para a *Mobil Oil Corporation*. O problema em questão consistia numa frota de cerca de 430 veículos cisterna (frota limitada e heterogénea) e 120 centros de distribuição espalhados por todos os Estados Unidos da América. Esta resolução ao problema baseava-se na solução proposta por Brown & Graves (1981), mas desta vez o veículo cisterna poderia abastecer vários postos de

combustível em cada viagem. Este problema também não incluía janelas temporais. Neste artigo apenas é apresentado um método exato para resolver o problema, não são usadas heurísticas.

Ao virar o século, Avella et al. (2004) estudou um problema de distribuição de combustível que consistia numa frota de 6 veículos cisterna (limitada e heterogénea), num único centro de distribuição e sem janelas temporais. Cada viagem poderia abastecer mais do que um posto de combustível. Uma particularidade desta solução seria que as encomendas teriam de ser de valores múltiplos de 1000 (litros) e que cada compartimento do veículo cisterna se encontraria ou completamente vazio ou totalmente cheio. Foi apresentado um modelo exato através de *Mixed Integer Programming* (MIP) e o problema foi resolvido através da heurística *Branch-and-Price*.

Após o estudo de duas redes de distribuição de combustível em Hong Kong, Ng et al. (2008) propôs um modelo em que o distribuidor teria pleno controlo sobre a rede, quando abastecer e quanto abastecer. O valor de vendas e inventário de cada posto de combustível seria controlado pelo distribuidor. Esta solução não garantia que os postos de combustível não incorreriam em ruturas de stock. Este modelo contava com 8 veículos cisterna (frota limitada e heterogénea), poderiam visitar múltiplos postos de combustível numa viagem, estaria disponível apenas um centro de distribuição e não teriam em conta janelas temporais para as entregas. O problema foi abordado de forma exata através de MIP e resolvido utilizando *Heuristic Clustering e Assignment and Routing Optimization*, ou seja, foi resolvido em 2 fases.

Cornillier et al. (2008a) divide o PSRP num *Tank Loading Problem* (TLP) e um *Routing Problem* (RP). Consiste na distribuição de combustível com uma frota ilimitada e heterogénea de veículos cisterna que podem fazer entregas em um ou dois postos de combustível por viagem. Há apenas um ponto de abastecimento disponível e não são utilizadas janelas temporais. Neste caso, o problema é modelado de forma exata utilizando ILP e de forma a resolvê-lo foram propostas duas fases: a primeira que resolve o TLP utilizando formulação ILP e a segunda fase que resolve o RP de duas formas, uma utilizando *Matching Approach* e outra utilizando *Column Generation Scheme*.

Cornillier et al. (2008b) apresenta um MPPSRP, que consiste no modelo PSRP onde o planeamento é realizado para um determinado número de dias em antecedência. Este problema assume uma frota limitada e heterogénea onde é possível a entrega a um ou dois postos de combustível por viagem. O abastecimento é realizado num único posto e não são assumidas quaisquer janelas temporais de entrega. Neste trabalho o problema é formulado em MIP e resolvido através de uma heurística de 4 fases criada pelo autor.

Um ano depois, Cornillier et al. (2009) desenvolve o PSRPTW, que consiste no PSRP onde a entrega a cada posto de combustível tem de ser realizada dentro de uma certa janela temporal. Este tipo de problema difere dos restantes VRP's devido

ao carregamento do veículo cisterna: no PSRPTW as rotas têm de ser calculadas e em simultâneo têm de ser atribuídos aos compartimentos os devidos combustíveis para cada viagem. Neste caso trata-se de uma frota limitada e heterogénea onde é possível abastecer até quatro postos de combustível por viagem. É assumido apenas um centro de distribuição. O problema é formulado em MIP e resolvido através de duas heurísticas próprias, onde uma delas tem em conta uma pré-seleção de arcos e outra a pré-seleção de rotas.

Popović et al. (2011) aplica o IRP à distribuição de combustível. Tem em conta a natureza estocástica do consumo de combustível e do processo de distribuição Mubiru et al. (2020). Para além desta flutuação imprevisível de procura, tem também em conta entregas de emergência e stocks de segurança dos postos de combustível. Este método consegue planear a distribuição para vários dias de uma vez. O modelo matemático exato é apresentado em MIP e para resolver o problema foi desenvolvida uma heurística própria de 2 fases. A primeira fase avalia as quantidades necessárias por cada posto durante vários dias e organiza a distribuição de forma que haja o mínimo de rotas efetuadas possível. A segunda fase distribui as rotas pelos dias onde há um custo de movimentação de inventário menor.

No seguinte artigo, Boctor et al. (2011) propõe a resolução de um sub-problema do PSRP. Denomina-se GTPP e tem em conta o número de veículos cisterna da frota heterogénea e o número limite de trabalho extra por parte dos condutores. Como o objetivo principal é maximizar o lucro, a frota heterogénea oferece alguma flexibilidade na criação das rotas. Outros objetivos do problema MIP são maximizar a quantidade de combustível entregue e minimizar o tempo de trabalho extra dos condutores. De forma a resolver o problema foi desenvolvida uma heurística própria.

Bektaş & Laporte (2011) define um PRP. Este tipo de problema tem em conta o aspeto ambiental, parâmetros como: distância da viagem, emissão de gases poluentes, consumo de combustível, tempos de viagem e custos de viagem são adicionados ao modelo. O problema é formulado através de *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) e resolvido através de uma heurística desenvolvida pelo autor. É muito mais difícil chegar à solução ótima deste problema, mas apresenta bons resultados quanto ao custo total de transporte.

Cornillier et al. (2012) expande o PSRP com abastecimento através de mais de um centro de distribuição e utiliza janelas temporais para as entregas. Cada centro de distribuição tem a sua própria frota, ou seja, um veículo cisterna não pode abastecer em dois centros de distribuição diferentes. O veículo pode visitar tantos postos de combustível quantos compartimentos tiver, durante uma viagem. As frotas são heterogéneas e limitadas. Não é apresentado um método de resolução exato, apenas a solução através de uma heurística própria de duas fases (cálculo de todas as rotas possíveis e escolha das rotas mais maximizam o lucro).

Triki (2013) entende que na maioria das resoluções de PSRP apenas é realizada a projeção para o dia seguinte e projetar a entrega num período de tempo mais alongado pode trazer vantagens à empresa de distribuição. Para isso é necessária

a adição do fator periodicidade ao PSRP. A diferença entre o PPSRP e o PVRP é adição de mais variáveis, como por exemplo a duração dos horários de trabalho dos condutores. Neste artigo é estudada uma empresa de distribuição no sul de Itália que dispõe de uma frota limitada e heterogênea de veículos para distribuir combustível aos 38 postos de combustível circundantes. O problema é abordado numa janela temporal (periodicidade) de 6 dias. O artigo não descreve método matemático exato. Neste caso foram aplicadas 4 heurísticas próprias, começam por encontrar uma forma de diminuir a quantidade distribuída por dia, o número de visitas a cada um dos postos, a distância percorrida em cada rota e também minimizar a distância entre cada posto ao centro virtual do seu cluster. Através de toda esta informação resolvem um VRP para obterem a solução quanto à disposição da distribuição.

Vidović et al. (2014) propõe um IRP dividido em dois sub-problemas de forma a resolver o problema da distribuição de combustível, um de inventário e outro de roteamento, onde o fornecedor determina a quantidade e o horário da entrega. Um modelo MIP é descrito e é aplicada uma heurística construtiva do tipo *Variable Neighborhood Descent* (VND). O método heurístico gera soluções com cerca de 4% de aumento de custos quanto ao IRP e cerca de 7% quanto ao IRPF (o mesmo problema, incluindo custos associados ao tamanho da frota). Deixa de ser possível a computação da resolução através do modelo MIP dentro de um intervalo de tempo aceitável a partir dos 20 postos de combustível devido à extensão do problema.

Benantar et al. (2016) define um MCVRPTW-AD. É um tipo de problema que junta o clássico VRP a veículos multi-compartimento, janelas temporais e ajuste de carga. O ajuste é realizado devido à diferença de encomendas dos postos de combustível durante o inverno, sendo este ajuste de até 10%. A frota é dividida em apenas 2 tipos de veículos, os veículos da empresa e veículos alugados. Este segundo caso aplica custos adicionais aos veículos alugados. Neste caso foi apenas assumido um centro de distribuição e os veículos poderiam percorrer mais do que um posto de combustível em cada viagem. Outra particularidade do problema descrito neste artigo é que certos veículos não poderiam visitar certos postos de combustível. O modelo do problema foi apresentado em MIP e de forma a resolvê-lo foi proposta a metaheurística *Tabu Search Algorithm*.

O problema desenvolvido por Carotenuto et al. (2017) é um PPSRP, que consiste na adição do fator periodicidade ao PSRP, ou seja, a distribuição pode ser planeada com alguns dias de antecedência. O problema apresenta uma solução exata formulada em MIP e de forma a resolvê-lo foram tidas em conta duas heurísticas do tipo *group-first-route-second*.

Benantar et al. (2020) resolveu o problema de abastecimento PSRP-AD. Neste artigo combinam o TLP e o MCVRP de forma a criar o PSRP-AD. Este factor de ajuste tem em conta as mesmas razões que Benantar et al. (2016), assim como a composição da frota. O método exato apresentado é MIP e de forma a resolver o problema foi desenvolvido pelo autor um algoritmo.

Al-Hinai & Triki (2020) adicionou ao PSRP outro fator: *Service Choice*. Isto

consiste na adição de 4 possibilidades quanto à entrega de combustível: uma entrega por semana, duas por semana, três por semana ou entrega diária (6 entregas). Esta particularidade permite maior flexibilidade por parte da empresa de distribuição, porque permite ajustar a quantidade de visitas semanais aos postos de combustível consoante as suas necessidades. O problema foi apresentado em MIP e resolvido através de 1 heurística de duas fases (fase de roteamento e fase de agendamento) e 2 algoritmos de fase única.

Chowmali & Sukto (2020) formula o MCVRP utilizando uma frota limitada e heterogénea de veículos e após apresentar a formulação do problema recorrendo a MILP e é resolvido utilizando uma variante do *Fisher and Jaikumar Algorithm* (FJA) (Fisher & Jaikumar, 1981). Os postos de combustível são organizados em grupos e a partir daí é resolvido um problema do tipo TSP de forma a minimizar a distância percorrida entre o grupo de postos, logo trata-se de um problema resolvido em duas fases distintas.

O problema que se segue aborda um CMPSRPMT (Xu et al., 2020). A particularidade deste problema é o facto do mapa estar dividido em áreas com as suas próprias viaturas pré-definidas. Estas viaturas podem então ser partilhadas entre as diversas áreas se o balanço de encomendas entre duas das áreas for muito díspar. O método exato utilizado foi MILP e de forma a resolver o problema foi criada uma heurística híbrida baseada em *Genetic Algorithm* (GA) e *Particle Swarm Optimization* (PSO).

O modelo *Fuel Replenishment Problem* (FRP) abordado por Wang et al. (2020) é baseado num VRP. Foi formulada uma solução em MILP (resolvida em CPLEX) para descrever o problema. Foi também utilizada uma heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para resolver instâncias mais extensas do problema. Foi notado que a heurística ALNS demorava apenas cerca de 21% do tempo necessário à resolução através de MILP e também apresentava melhores situações, quer fosse um problema extenso ou não. Foram tidos em consideração 60 postos de combustível, 20 veículos, 3 produtos e 4 compartimentos por veículo.

Shao & Dessouky (2020) introduz o VRPAFVFFT, um VRP que tem em conta a utilização de combustíveis alternativos para a locomoção dos veículos de entrega e tempo de carga de veículos fixo. Foi realizado um modelo MIP e utilizada para a resolver o problema uma heurística ALNS.

Devido à complexidade do MCVRP abordado por Yahyaoui et al. (2020), o modelo exato utilizado foi MIP e foram propostas as heurísticas *Adaptive Variable Neighborhood Search Algorithm* (AVNS) e *Genetic Algorithm with Partially Mapped Crossover Operator* (GAPMX) para a resolução do problema. O método AVNS chegou a soluções quase ótimas obtidas por CPLEX (método exato) para problemas de pequena e grande escala.

Chowmali & Sukto (2021) tem como foco a utilização de dois algoritmos de forma a resolver o MCVRP. O MCVRP é definido de uma forma relativamente

simples (em MILP), minimizando a distância percorrida durante as viagens e o número de veículos cisterna utilizados. FJA e ALNS são combinados de forma a criar um algoritmo híbrido que seja aplicável a este tipo de problema.

Tendo em conta situações de emergência, o autor do artigo (Xu & Lyu, 2021), resolveu um problema de distribuição de combustível. Em particular, a mais recente pandemia mundial (COVID-19) causou o bloqueio de ligações entre alguns países e, inclusive, entre algumas cidades. Isto afetou a entrega de bens essenciais, o que dificultou a distribuição eficiente e atempada de combustíveis. Daqui surge o CMPDVRPE, o qual o autor desenvolveu um método exato em MILP e foi resolvido utilizando o algoritmo *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO). Após comparação de custos antes e depois da aplicação deste método foi notado que através da cooperação entre postos de combustível e centros de distribuição (de forma a contornar estradas bloqueadas, por exemplo) não só diminuiu o custo de operação como diminuiu o tempo total de entrega e o número de veículos cisterna utilizados.

Ostermeier et al. (2021) apresenta um método exato geral para o MCVRP em MIP. Após esta exposição, expõe algumas ideias e particularidades dos problemas de roteamento de veículos tendo como base uma série de artigos anteriormente publicados.

De forma a melhorar a eficiência na entrega de combustíveis a postos localizados em autoestradas (daí *Highway Petrol Station Replenishment Problem* (HPSRP)) este autor (Wei et al., 2021) desenvolveu um modelo MILP que tem como objetivo diminuir o custo de operação. Foi utilizado um caso real onde existem oito postos de combustível, um centro de distribuição e oito veículos cisterna para a distribuição de combustível. Ao monitorizar o problema em tempo real e aplicar o modelo é possível manter os custos de operação mais baixos, pois o problema passa a ser abordado de uma maneira mais reativa à imprevisibilidade. O volume de combustível em inventário dos postos de combustível é mantido num nível mais baixo, mas sempre em segurança de forma a combater flutuações muito rápidas na procura.

Tabela 2.4 – Tabela-resumo dos problemas descritos

Autor	Tipo de problema	Baseado no problema	Nº de compartimentos	Tamanho da frota	Tipo de Frota	P. Combustível p/ viagem	Nº de Centros de distribuição	Janelas Temporais	Método Exato	Método Heurístico	Balanc. de cargas
(Brown & Graves, 1981)	TDP	TSP	Vários	Limi.	Heter.	Um	Vários	Não	ILP	MCFP	Não
(Brown et al., 1987)	TDP	TSP	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Vários	Não	ILP	-	Não
(Avella et al., 2004)	VRP	-	Único	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MIP	Branch-and-Price	Não
(Ng et al., 2008)	IRP	-	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MIP	Heuristic clustering e Assignment and Routing Optimization	Não
(Cornillier et al., 2008a)	PSRP	-	Vários	ILimi.	Heter.	Um/Dois	Único	Não	ILP	Matching Approach/Column Generation Scheme	Não
(Cornillier et al., 2008b)	MPPSRP	PSRP	Vários	Limi.	Heter.	Um/Dois	Único	Não	MIP	Heurística Própria	Não
(Cornillier et al., 2009)	PSRPTW	PSRP	Vários	Limi.	Heter.	Até Quatro	Único	Sim	MIP	2 heurísticas próprias	Não
(Popović et al., 2011)	IRP	IRP	Vários	Limi.	Homo.	Até três	Único	Não	MIP	Heurística própria	Não
(Boctor et al., 2011)	GTPP	PSRP	Único	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MIP	Heurística própria	Não
(Bektaş & Laporte, 2011)	PRP	VRP	Único	Limi.	Heter.	Vários	Único	Sim	MILP	Heurística Própria	Não
(Cornillier et al., 2012)	MPSRPTW	PSRP	Vários	Limi.	Heter.	Igual ao n-º de compartimentos	Vários	Sim	-	Heurística Própria	Não
(Triki, 2013)	PSPRP	PSRP	Único	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	-	Série de 4 heurísticas próprias	Não
(Vidović et al., 2014)	IRP	IRP	Vários	ILimi./Limi.	Homo.	Até 3	Único	Não	MIP	VND	Não
(Benantar et al., 2016)	MCVRPTW-AD	VRP	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Único	Sim	MIP	Tabu Search Algorithm	Não
(Carotenuto et al., 2017)	PSPRP	PSRP	Vários	Limi.	Homo.	Vários	Único	Não	MIP	2 heurísticas próprias	Não
(Benantar et al., 2020)	PSRP-AD	PSRP	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MIP	Algoritmo próprio	Não
(Al-Hinai & Triki, 2020)	PSPRP-SC	PSRP	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MIP	1 heurística e 2 algoritmos	Não
(Chowmali & Sukto, 2020)	MCVRP	VRP	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MILP	FJA (Variante)	Não
(Xu et al., 2020)	CMPSRPMT	PSRP	Vários	Limi.	Heter.	Um	Vários	Sim	MILP	Heurística híbrida (GA e PSO)	Não
(Wang et al., 2020)	FRP	VRP	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MILP	ALNS	Não
(Shao & Dessouky, 2020)	VRPAVFVFT	VRP	Único	Limi.	Heter.	Vários	Vários	Não	MIP	Heurística Híbrida (ALNS, MIP e local search)	Não
(Yahyaoui et al., 2020)	MCVRP	VRP	Vários	Limi.	Homo.	Vários	Único	Sim	MIP	2 algoritmos (AVNS e GAPMX)	Não
(Chowmali & Sukto (2021)	MCVRP	VRP	Vários	Limi.	Heter.	Vários	Único	Não	MILP	FJA-ALNS	Não
(Xu & Lyu, 2021)	CMPDVRPE	VRP	Vários	Limi.	Homo.	Vários	Vários	Sim	MILP	Heurística (MOPSO como base)	Não
(Ostermeier et al., 2021)	MCVRP	VRP	Vários	-	-	-	-	-	MIP	-	Não
(Wei et al., 2021)	HPSRP	PSRP	Único	Limi.	Heter.	Vários	Único	Sim	MILP	-	Não

DESENVOLVIMENTO

3.1 Definição do problema

3.2 *Load Distribution Diagram*

3.3 Formulação matemática

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Definição do problema

O problema abordado neste trabalho centra-se na distribuição de combustível, no qual existe uma série de postos de combustível que têm uma determinada procura de produtos (que podem ser gasóleo, gasolina 95, gasolina 98, etc). Para satisfazer esta procura são utilizados veículos de forma a distribuir as quantidades exigidas pelos postos. Os veículos utilizados são do tipo veículos-cisterna, que são constituídos por diferentes compartimentos. De forma a realizar a distribuição de combustível é necessário o devido aprovisionamento do combustível pelos diversos compartimentos da cisterna. Com o veículo devidamente carregado é iniciada a rota de distribuição (tendo em conta o custo de distribuição mais baixo ou a rota de menor distância). É necessário garantir ao longo de toda a rota que a posição e a força realizada pelo centro de gravidade do veículo favorecem a estabilidade da carga. Assim sendo, a rota pode ser realizada de forma segura e em conformidade com a legislação associada a veículos pesados de transporte de mercadorias.

A distribuição da carga num veículo carregado é um factor a ter em conta, quer se trate de um camião, reboque ou semi-reboque. A carga tem de estar devidamente distribuída entre os apoios (eixos do veículo). Os valores máximos e mínimos por apoio são definidos tanto pelo fabricante como pela legislação nacional relacionada com o transporte comercial de matérias.

Esta distribuição da carga é influenciada pela posição e intensidade do peso efetuada pela carga. Ao longo deste trabalho, o centro de gravidade do compartimento estará localizado no seu centro geométrico. No caso das cisternas, a posição longitudinal do centro de gravidade estará sempre no plano vertical que intersesta o centro geométrico da cisterna e a intensidade do peso pode ser calculada através da multiplicação do somatório da quantidade líquida transportada pela densidade da matéria em questão. Durante todo o trabalho foi omitida a posição transversal do centro de gravidade das cisternas, assume-se que as oscilações do líquido dentro das cisternas são minimizadas através da instalação de placas longitudinais com o fim de anular estas mesmas oscilações.

Neste trabalho pretende-se determinar a alocação dos diferentes tipos de combustível requeridos pelos diferentes postos de combustível aos diferentes comparti-

mentos da cisterna do veículo, garantindo que o centro de gravidade do combustível transportado cumpre com as especificações do veículo e a legislação ao longo de toda a rota.

3.2 *Load Distribution Diagram*

A ferramenta utilizada de forma a avaliar a distribuição de carga é no veículo é o *load distribution diagram (LDD)* (Ramos et al., 2018; Silva et al., 2018). O *LDD* é um gráfico bidimensional que mostra a carga máxima admissível de um veículo em função da posição longitudinal do seu centro de gravidade, definindo assim a área onde a localização e intensidade do centro de gravidade da carga é admissível.

As restrições impostas sobre o balanceamento da carga definem uma determinada área, e se o centro de gravidade ao longo da viagem se encontrar dentro da região delimitada, o veículo circula em conformidade com a legislação e em plena segurança quanto ao aprovisionamento de carga.

De forma a elaborar um *LDD* que se aplique à situação que será estudada serão consideradas as seguintes premissas:

- O veículo é simétrico em relação ao plano vertical que se estende da frente à retaguarda do mesmo;
- O centro de gravidade de toda a carga pode ser reduzido a um ponto onde está concentrado todo o peso de combustível;
- Os apoios no solo podem ser reduzidos a dois (se o veículo estiver configurado com dois eixos à retaguarda o apoio traseiro considerado será ao centro de ambos os eixos);
- A distância entre eixos resultará sempre na distância entre o apoio frontal e o apoio à retaguarda.

A construção do diagrama em questão tem como *input* os seguintes dados:

- FTR_{max} - Carga máxima admissível no apoio frontal (kg);
- RTR_{max} - Carga máxima admissível no apoio traseiro (kg);
- TWB - Distância entre eixos teórica (m);
- UR - Tara do veículo (kg);
- H_u - Distância longitudinal entre o apoio frontal e o centro de gravidade do veículo em vazio (m);
- S - Distância longitudinal entre o apoio frontal e a frente da cisterna (m);

- W_{max} - Carga máxima transportável (kg);
- PCF - Carga mínima percentual no apoio frontal (%);
- PCT - Carga mínima percentual no apoio traseiro (%).

Outras variáveis utilizadas ao longo da dedução das restrições de carga são:

- W - Carga no centro de gravidade do veículo (kg);
- x - Posição do centro de gravidade (m);
- PD - Produto do peso e distância do centro de gravidade à extremidade dianteira da cisterna.

Na Figura 3.1 estão ilustradas as variáveis que podem ser representadas visualmente.

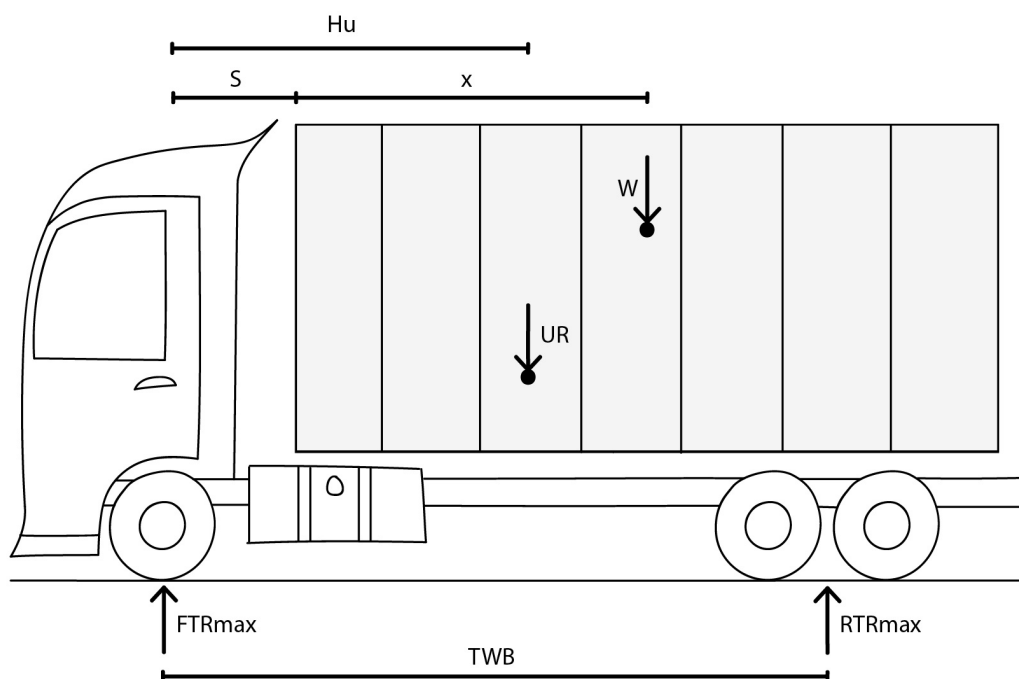


Figura 3.1 – Representação das variáveis necessárias ao cálculo do LDD

A variável W resulta do somatório de toda a carga transportada pelo veículo no momento. Já x , representa a posição do centro de gravidade de toda a carga transportada e PD é o resultado da multiplicação entre as variáveis anteriores. Esta última variável é necessária à simplificação do problema, visto que se trata de um sistema complexo com múltiplos centros de gravidade (um centro de gravidade por compartimento, que, posteriormente, através de um cálculo, reduzir-se-ão a apenas um centro de gravidade de toda a carga).

Para a construção do gráfico de distribuição de carga são necessárias cinco equações matemáticas, a seguir descritas, que permitem delinear a área que irá indicar a conformidade ou não conformidade do veículo com a legislação aplicável.

Carga máxima do eixo frontal

A carga máxima admissível no apoio frontal não pode ser excedida. Para garantir esta restrição é necessário o cálculo de uma equação de momentos em relação ao apoio traseiro, que será igualada a zero devido a se tratar de um sistema estático. Equação de momentos em relação ao apoio traseiro (sentido positivo sendo na orientação dos ponteiros do relógio):

$$\begin{aligned} \sum \vec{M}_R &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow FTR_{max} \times TWB - UR \times (TWB - H_u) - W \times (TWB - S - x) &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow W \times x &= W \times TWB - W \times S - FTR_{max} \times TWB + UR \times (TWB - H_u) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow PD &= W \times (TWB - S) + U_R \times (TWB - H_u) - FTR_{max} \times TWB \end{aligned} \quad (3.1)$$

A equação (3.1) representa a área sombreada delimitada pelo limite (1) na Figura 3.2.

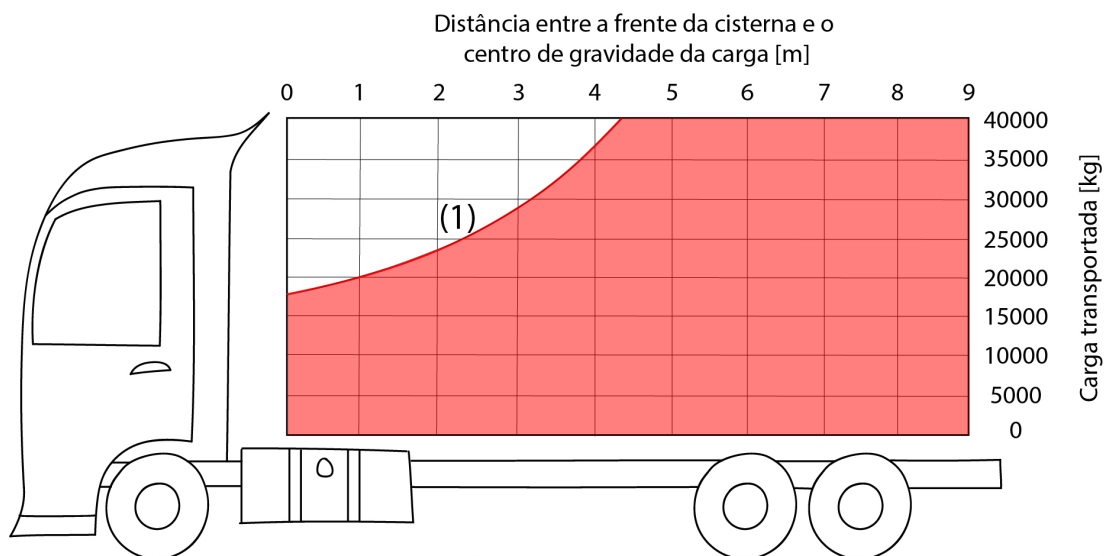


Figura 3.2 – LDD - representação da restrição de carga máxima no eixo frontal

Carga máxima do eixo traseiro

A carga máxima admissível no apoio traseiro não pode ser excedida. De forma a garantir a anterior afirmação é indispensável o cálculo de uma equação de momentos em relação ao apoio frontal, que será também igualada a zero devido a se tratar de um sistema estático. Equação de momentos em relação ao apoio frontal (sentido

positivo sendo na orientação dos ponteiros do relógio):

$$\begin{aligned}
 \sum \vec{M}_F &= 0 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow UR \times H_u + W \times (S + x) - RTR_{max} \times TWB &= 0 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow W &= -UR \times H_u - W \times S + RTR_{max} \times TWB \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow PD &= -W \times S + RTR_{max} \times TWB - U_R \times H_u
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

A equação (3.2) resulta no limite (2), da Figura 3.3.

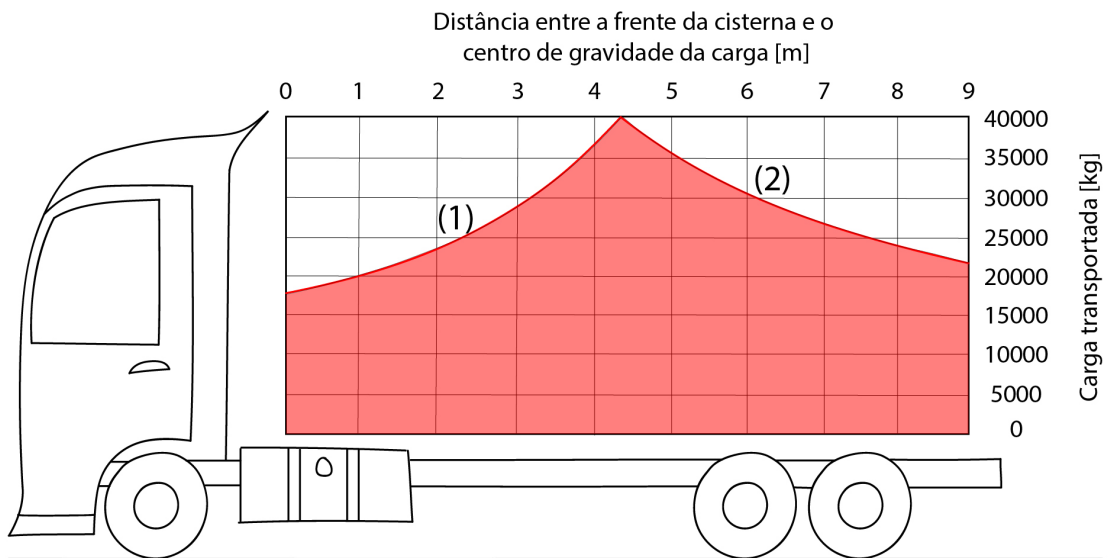


Figura 3.3 – LDD - representação das restrições de carga máxima no eixo frontal e traseiro

Máximo peso bruto do veículo

A carga máxima admissível resultante dos limites máximos exigidos na legislação não pode ser excedida. Esta restrição resulta da limitação do total de carga transportada, conforme os máximos delineados por lei.

A simples equação pode ser obtida a partir de:

$$W \leq W_{max} \quad (3.3)$$

Onde W_{max} é o valor de carga máxima para a segura circulação de um determinado tipo de veículo na via pública. A equação (3.3) resulta no limite (3) visível na Figura 3.4.

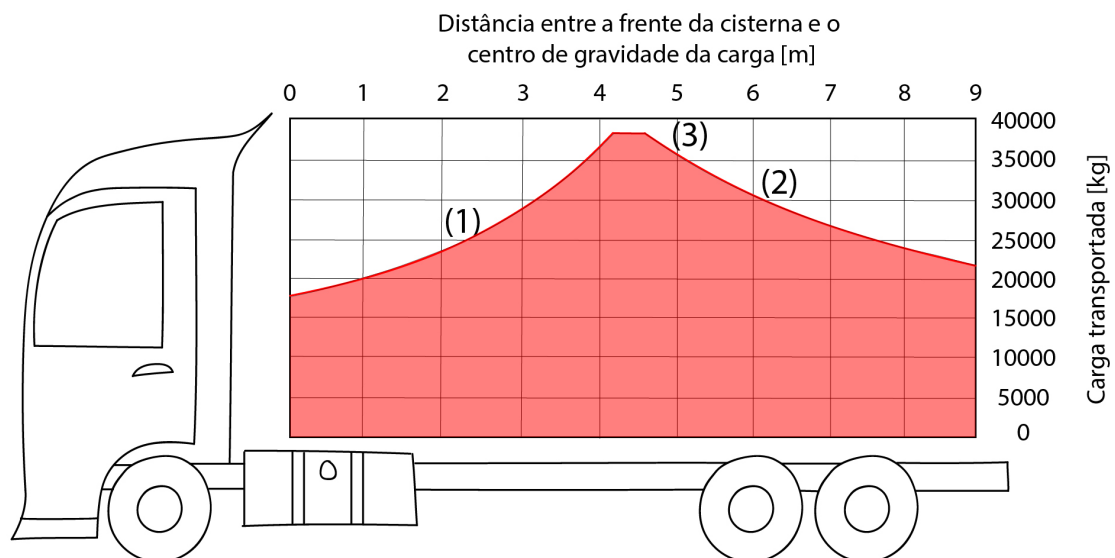


Figura 3.4 – LDD - representação das restrições de carga máxima no eixo frontal e traseiro e peso bruto

Carga mínima no eixo direcional

A carga no apoio frontal (eixo ou eixos direcionais) tem um valor mínimo, que resulta de uma determinada percentagem (entre 20 e 35%) da carga no apoio frontal durante a rota. Esta restrição garante que o eixo direcional estará, ao longo de toda a viagem, em devido contacto com o pavimento, de forma a evitar qualquer tipo de derrapagem ou até a total separação do pneu com a faixa de rodagem. A equação de momentos pode ser igualada a zero devido a se tratar de um sistema estático. A equação que permite garantir o valor mínimo de carga no apoio frontal pode ser obtida a partir da equação de momentos em relação ao apoio traseiro (sentido

positivo sendo na orientação dos ponteiros do relógio):

$$\begin{aligned} \sum \vec{M}_R &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow PCF \times (UR + W) \times TWB - UR \times (TWB - H_u) - W \times (TWB - S - x) &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow W \times x &= -PCF \times (UR + W) \times TWB + UR \times (TWB - H_u) + W \times TWB - W \times S \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow PD &= W \times (TWB - S) + U_R \times (TWB - H_u) - PCF \times (U_R + W) \times TWB \end{aligned} \quad (3.4)$$

A equação (3.4) resulta no limite (4) representada na Figura 3.5.

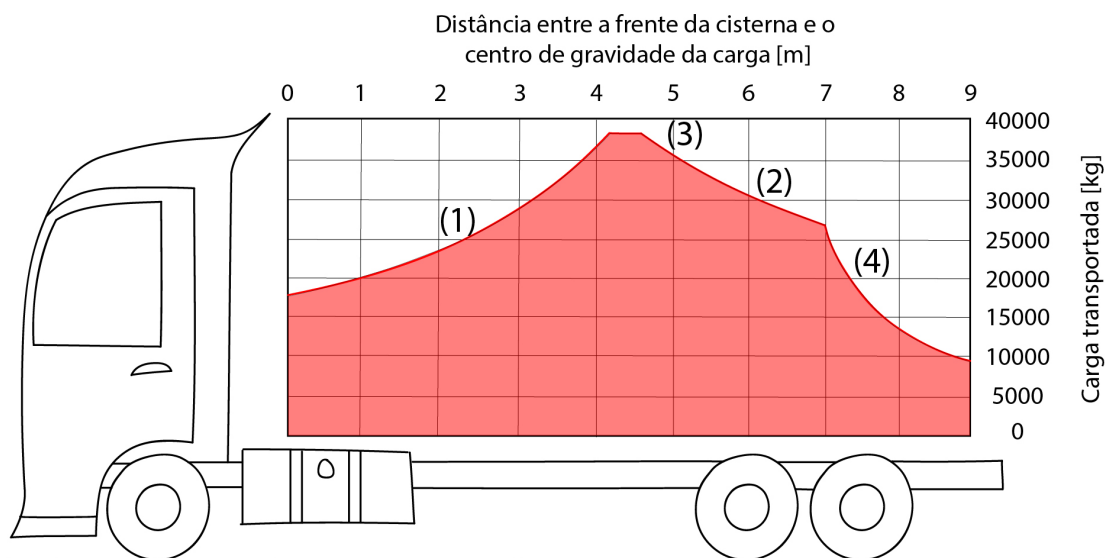


Figura 3.5 – LDD - representação das restrições de carga máxima no eixo frontal e traseiro e peso bruto e carga mínima no eixo direcional

Carga mínima por eixo/ motor de tração

A carga no apoio traseiro tem um valor mínimo, que resulta de uma determinada percentagem (normalmente 20%) da carga no apoio traseiro durante a rota. Esta restrição garante que o eixo (ou eixos) traseiro estará, ao longo de toda a viagem, sobre carga e em devido contacto com o pavimento, de forma a evitar qualquer tipo de derrapagem ou até a ausência de contacto total do pneu com a faixa de rodagem. A equação de momentos pode ser igualada a zero devido a se tratar de um sistema estático.

A equação que permite garantir o valor mínimo de carga no apoio traseiro pode ser obtida a partir da equação de momentos em relação ao apoio dianteiro (sentido

positivo sendo na orientação dos ponteiros do relógio):

$$\begin{aligned}
 \sum \vec{M}_F &= 0 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow -PCT \times (UR + W) \times TWB + UR \times H_u + W \times (S + x) &= 0 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow W \times x = PCT \times (UR + W) \times TWB - UR \times H_u - W \times S &\Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow PD \geq PCT \times (UR + W) \times TWB - W \times S - UR \times H_u &
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

A equação (3.5) resulta no limite (5) representada na Figura 3.6.

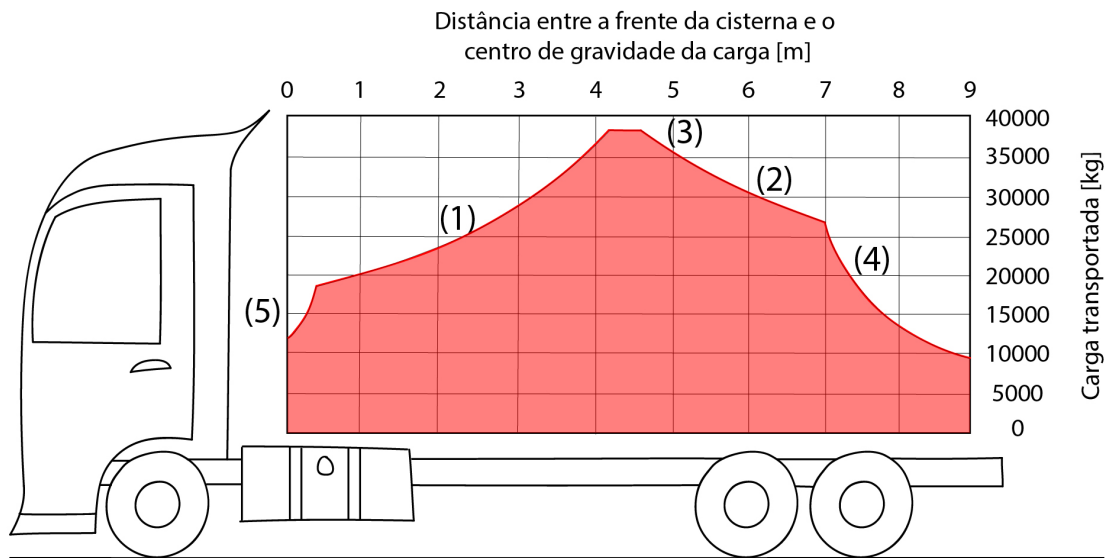


Figura 3.6 – Representação do LDD completo

Sabendo que a cisterna do veículo se divide em vários compartimentos será calculado o centro de gravidade de toda a carga em função das cargas em cada compartimento. A fórmula generalizada da localização do centro de gravidade de vários elementos é:

$$\bar{x} = \frac{\sum P \times x}{\sum P},$$

Onde P significa peso de cada elemento e x representa a posição do centro de gravidade de cada elemento. Daqui resulta a variável \bar{x} , a posição do centro de gravidade de todos os elementos. Através deste valor e do somatório de todos os pesos chegamos ao centro de gravidade mostrado posteriormente.

Na Figura 3.7 temos o exemplo de um *LDD* onde a carga está devidamente distribuída dentro da cisterna. O veículo está dividido em 7 compartimentos, cada um com a sua capacidade máxima e capaz de transportar apenas 1 tipo de combustível por viagem. A área mais escura representa a quantidade que os compartimentos transportam no momento, e ao cruzar o valor da carga total transportada com a

distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga chegamos à posição do centro de gravidade no *LDD*. Neste exemplo o veículo está conforme os limites impostos e é passível de circular em segurança.

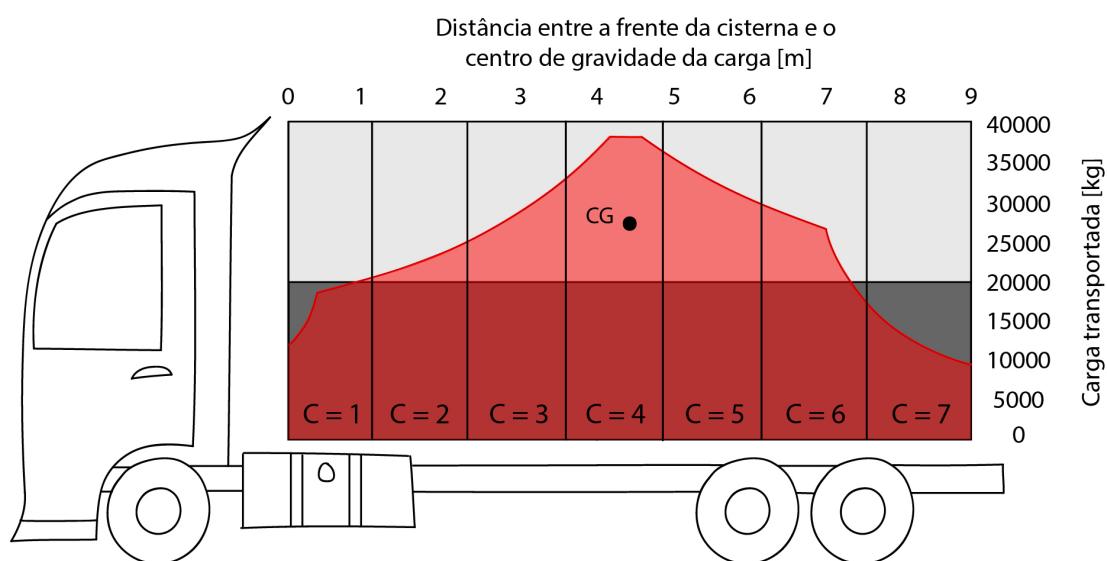


Figura 3.7 – Exemplo de LDD em conformidade com os limites

Já na Figura 3.8, temos o mesmo veículo a transportar a mesma quantidade de carga, mas através de uma distribuição não ideal sobre os compartimentos. Os primeiros quatro compartimentos armazenam toda a carga, do total de sete compartimentos, o que dificulta o balanceamento da carga. O veículo não circulará em conformidade com as restrições propostas, pois o centro de gravidade da carga encontra-se fora da região que assegura a devida segurança ao longo da viagem.

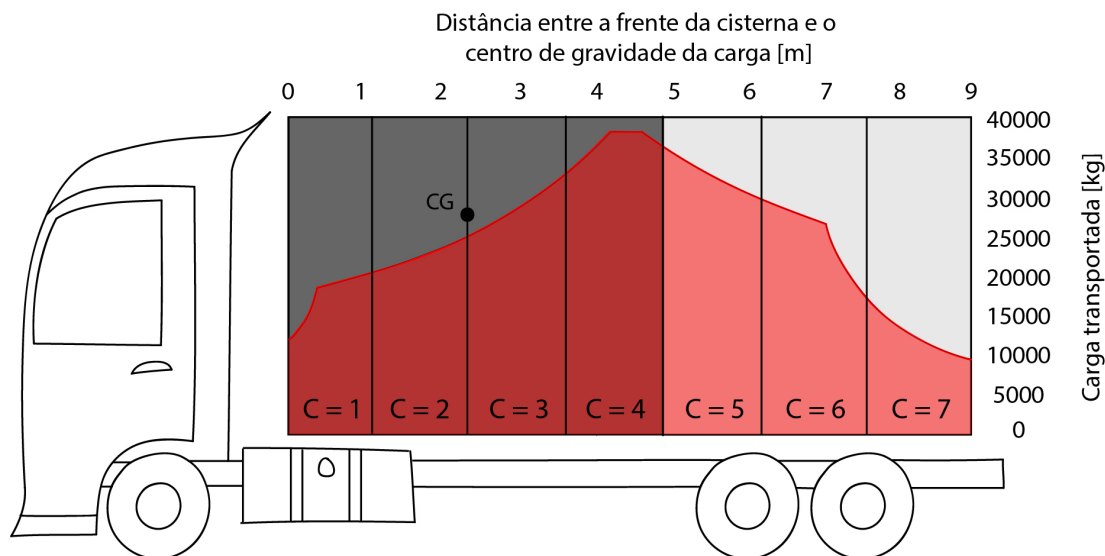


Figura 3.8 – Exemplo de LDD em não conformidade com os limites

Ao longo da viagem serão realizadas paragens em cada posto de combustível visitado. E em cada posto será entregue uma determinada quantidade de combustível, o que faz com que tenhamos de verificar o *LDD* em cada paragem. Na Figura 3.9 é possível visualizar a progressão do centro de gravidade no *LDD* ao longo de toda a viagem. O veículo começa com o centro de gravidade da carga da posição 1, e em cada paragem fica cada vez mais leve, e conseqüentemente será mais fácil respeitar as restrições de carga impostas. O centro de gravidade da carga representado na posição 1 representa o centro de gravidade da carga à saída do centro de distribuição, o que inclui a carga que irá ser transportada para os outros 5 postos de combustível. O centro de gravidade da carga na posição 2 representa o centro de gravidade da carga transportada para os postos de combustível 2, 3, 4, 5 e 6. Os outros centros de gravidade representados seguem a mesma lógica.

No caso ilustrado abaixo, na última paragem do veículo (visível como o ponto 6 da figura) visto à carga transportada ser de 4000 kg seria possível que a mesma fosse transportada em qualquer compartimento, isto porque qualquer ponto com 4000 kg de carga seria admissível pelo *LDD*. Na primeira paragem do veículo (visível na figura como o ponto 1) já não se verifica o mesmo. Quando o veículo transporta a carga máxima a posição do centro de gravidade tem de estar, obrigatoriamente, entre 4,2 a 4,6 m da frente da cisterna de forma a ser admissível ao *LDD*.

Através desta análise é possível concluir que o momento mais crítico de toda a viagem é logo à saída do centro de distribuição, onde o veículo se encontra com a cisterna praticamente completa.

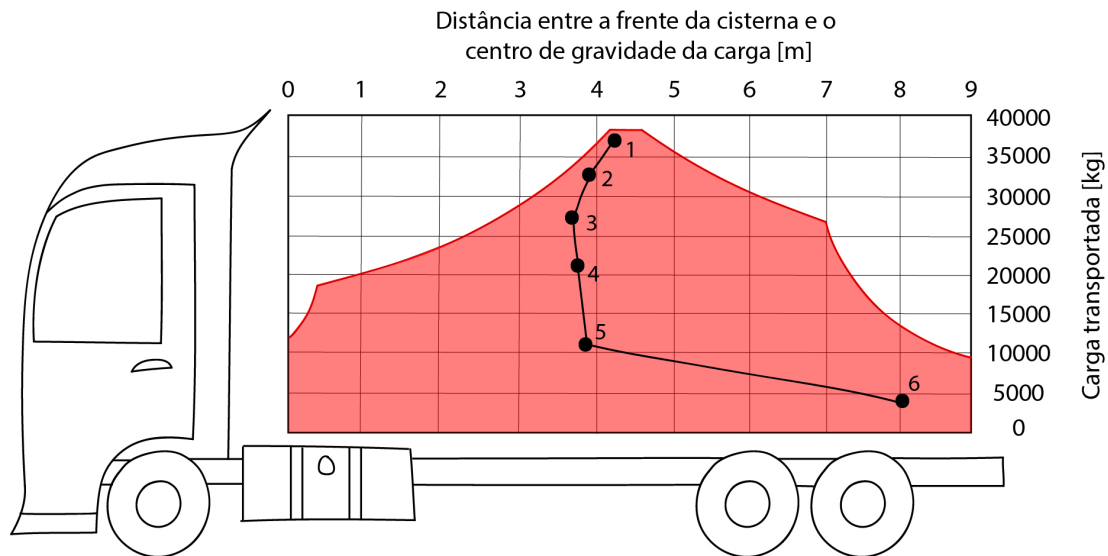


Figura 3.9 – Evolução do centro de gravidade ao longo de toda a rota no *LDD*

Visto que o *LDD* é verificado a cada uma das paragens, a variável W passará a depender, também, do progresso da viagem de distribuição de combustível. Passando então a W_j , onde j representa o posto de combustível visitado.

Na Secção 3.3 será proposto um modelo matemático de programação linear inteira mista que permitirá definir a quantidade de de cada tipo de combustível de cada posto de combustível a atribuir a cada compartimento da cisterna, garantindo que o centro de gravidade da da carga se mantém dentro dos limites definidos pelo *LDD* ao lo go de toda a viagem.

3.3 Formulação matemática

O modelo de programação linear inteira mista (PLIM) proposto para o problema tem por base os seguintes pressupostos:

- A rota de distribuição, a procura dos postos de combustível e os dados da viatura são conhecidos;
- Pretende saber-se a quantidade de combustível de cada compartimento que será entregue em cada posto de combustível;
- O modelo é executado apenas uma vez, ou seja, garante que o centro de gravidade está numa posição que garante a estabilidade dinâmica ao longo de todo o percurso da rota de distribuição;
- Cada compartimento pode apenas transportar um tipo de produto.

Antes da apresentação do modelo PLIM serão definidos os conjuntos necessários à descrição dos dados do problema, apresentam-se os diferentes parâmetros considerados e definem-se as variáveis de decisão.

Conjuntos:

- $c \in C = \{1, \dots, c_m\}$ - Compartimentos;
 $k \in K = \{1, \dots, k_m\}$ - Tipos de Produto;
 $j, j' \in J = \{1, \dots, j_m\}$ - Postos de combustível.

Parâmetros:

- FTR_{max} : Carga máxima admissível no apoio frontal (kg);
 RTR_{max} : Carga máxima admissível no apoio traseiro (kg);
 TWB : Distância entre eixos teórica (m);
 UR : Tara do veículo (kg);
 H_u : Distância longitudinal entre o apoio frontal e o centro de gravidade do veículo em vazio (m);
 S : Distância longitudinal entre o apoio frontal e a frente da cisterna (m);
 W_{max} : Carga máxima transportável (kg);
 PCF : Carga mínima percentual no apoio frontal (%);
 PCT : Carga mínima percentual no apoio traseiro (%);
 P_{kj} : Procura de produto k pelo posto de combustível j (litro);

CTT_{jk} : Capacidade total do tanque de produto k no posto de combustível j (litro);

CAT_{jk} : Capacidade atual do tanque de produto k no posto de combustível j (litro);

QMT : Quantidade máxima transportável na cisterna (litro);

CMC_c : Capacidade máxima de cada compartimento (litro);

D_k : Densidade do produto k (kg/litro);

X_c : Posição do centro gravítico de cada compartimento c relativamente à frente da cisterna (m).

Variáveis de decisão:

α_{ckj} : Quantidade de combustível no compartimento c de produto k atribuído ao posto de combustível j (litro), $c \in C, k \in K, j \in J$;

wgt_{ckj} : Peso da quantidade de combustível transportada no compartimento c de produto k para o posto de combustível j (kg), $c \in C, k \in K, j \in J$;

$$Y_{ckj} = \begin{cases} 1, & \text{se o compartimento } c \text{ transporta produto } k \text{ atribuído ao posto de} \\ & \text{combustível } j, \quad c \in C, k \in K, j \in J; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$T_{ck} = \begin{cases} 1, & \text{se o compartimento } c \text{ transporta o produto } k \quad c \in C, k \in K; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

PD_j : Produto do peso e distância do centro de gravidade à extremidade dianteira da cisterna no posto de combustível j , $j \in J$;

W_j : Carga no centro de gravidade do veículo no posto de combustível j (kg), $j \in J$;

γ_j : Número de compartimentos atribuídos ao posto de combustível j , $j \in J$;

Max_γ : Maior número de compartimentos diferentes atribuídos ao posto de combustível j , $j \in J$.

Por uma questão de clareza, a formulação matemática (3.6)-(3.25) é dividida e explicada nas quatro subsecções seguintes. Em primeiro lugar define-se a função objetivo, depois apresentam-se as restrições relacionadas com o aprovisionamento, seguida do conjunto de restrições relacionadas com a garantia do cumprimento do LDD ao longo de todo o percurso da rota e por último, apresenta-se o domínio das variáveis de decisão.

Função Objetivo:

A função objetivo do modelo matemático tem como função definir o objetivo do problema. No caso apresentado, o objetivo será minimizar o número de compartimentos atribuídos a cada posto de combustível, de forma a reduzir tempos de carga e descarga, reduzindo custos logísticos e minimizando o tempo de distribuição de combustível, tornando todo o processo de distribuição de combustível mais eficiente. Logo, a função objetivo considerada é a seguinte:

$$\text{Min } \text{Max}_\gamma \quad (3.6)$$

Restrições de provisionamento:

As restrições de provisionamento têm como objetivo definir quais compartimentos transportam qual produto assim como a quantidade transportada. O modelo tem em conta a impossibilidade de misturar substâncias no mesmo compartimento, a capacidade máxima do compartimento não pode ser excedida e que a capacidade transportada tem de satisfazer a procura. O modelo respeita, também, a capacidade máxima dos tanques de cada posto de combustível, no caso de ser entregue mais do que o encomendado.

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{c=1}^C Y_{ckj} = \gamma_j, \quad j \in J \quad (3.7)$$

$$\gamma_j \leq \text{Max}_\gamma, \quad j \in J \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{ckj} \leq |J| \cdot T_{ck}, \quad \forall c \in C, \forall k \in K \quad (3.9)$$

$$\sum_{k=1}^K T_{ck} \leq 1, \quad \forall c \in C \quad (3.10)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \alpha_{ckj} \leq QMT \quad (3.11)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \alpha_{ckj} \leq CMC_c, \quad \forall c \in C \quad (3.12)$$

$$\sum_{c=1}^C \alpha_{ckj} \geq P_{kj}, \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (3.13)$$

$$\alpha_{ckj} \leq QMT \cdot Y_{ckj}, \quad \forall c \in C, \forall k \in K, \forall j \in J \quad (3.14)$$

$$\sum_{c=1}^C \alpha_{ckj} \leq CTT_{jk} - CAT_{jk}, \quad \forall k \in K, \forall j \in J \quad (3.15)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \leq j} \alpha_{cki} \times D_k = wgt_{cj}, \quad \forall c \in C, \forall j \in J \quad (3.16)$$

$$PD_j = \sum_{c=1}^C (X_c \times wgt_{cj}), \quad \forall j \in J \quad (3.17)$$

$$W_j = \sum_{c=1}^C wgt_{cj}, \quad \forall j \in J \quad (3.18)$$

As restrições (3.7) utilizam-se para determinar o número de compartimentos utilizados para transportar qualquer tipo de produto k a cada posto de combustível j . Enquanto que, as restrições (3.8) determinam o maior número de compartimentos diferentes utilizados para transportar cada produto.

Se um compartimento c ficar alocado com um determinado tipo de produto k para um posto de combustível j ($Y_{ckj} = 1$), a atribuição do compartimento c ao produto k ($T_{ck} = 1$) será realizada através das restrições (3.9). E de forma a restringir que a cada compartimento c só seja alocado um tipo de produto k foram aplicadas as restrições (3.10).

Sabendo a quantidade máxima transportável da cisterna (em litro) foi restringida a quantidade transportável total. O somatório de toda a quantidade de todos os compartimentos c , de qualquer tipo de produto k e de todos os postos de combustível j visitados é limitado pela quantidade máxima transportável, como visto nas restrições (3.11). E de modo a limitar também a quantidade máxima por compartimento c foram aplicadas as restrições (3.12). O somatório da quantidade entregue de cada tipo de produto k a cada posto de combustível j é limitado pela capacidade máxima do compartimento c , este sendo um dado dado pelo fabricante da cisterna ou veículo.

No problema abordado temos de satisfazer a procura de cada tipo de produto k em todos os postos de combustível j . Com esta finalidade foram criadas as restrições (3.13). A quantidade entregue poderá ser superior à procura.

As restrições (3.14) garantem que se o o compartimento c transporta uma quantidade de produto k para o posto de combustível j superior a zero ($\alpha_{ckj} > 0$), então

a variável binária Y_{ckj} irá tomar o valor um.

De forma a ser possível entregar mais do que a procura exigida pelos diversos postos de combustível serão introduzidos parâmetros que permitam saber a capacidade total e capacidade atual dos tanques de cada posto de combustível. Ao termos acesso a este dado será possível exceder o valor da procura sem causar qualquer tipo de transtorno ao cliente. Este método de trabalho é vantajoso pois tornar-se-à sempre mais lucrativa a viagem quando o veículo parte do centro de distribuição completamente lotado. Logo, as restrições (3.15) indicam que o somatório da quantidade de combustível no compartimento c do tipo k entregue ao posto de combustível j não excede a capacidade dos tanques de armazenamento do posto de combustível do tipo de produto k do posto de combustível j .

Com a finalidade de calcular a quantidade transportada em cada compartimento c para cada posto de combustível j foram aplicadas as restrições (3.16). Esta variável wgt_{cj} é cumulativa, ou seja, quando há a paragem no segundo posto de combustível, a variável toma como valor a quantia entregue no primeiro e no segundo posto de combustível. Esta característica será necessária para outras variáveis que derivam desta aplicadas nas restrições de carga. wgt_{cj} resulta da multiplicação do somatório da quantia (em litro) transportada pela respetiva densidade do tipo de produto k .

Necessária às posteriores restrições de carga, a variável PD_j auxilia no cálculo do centro de gravidade. As restrições (3.17) permitem o cálculo da mesma, através do sumatório da posição do centro de gravidade de cada compartimento c pela quantidade atual em cada compartimento c . O cálculo é realizado tendo em conta o somatório de todos os compartimentos, para assim chegar a uma variável auxiliar ao cálculo do centro de gravidade geral da carga.

Outra variável necessária será o valor em kg no centro de gravidade de toda a carga em cada paragem. Para isso, as restrições (3.18) permitem o cálculo da variável W_j , somatório de toda a carga transportada quando o veículo está no posto de combustível j .

Restrições de balanceamento de carga:

As restrições de balanceamento de carga consistem em cinco equações que delinham o *LDD* como descrito na subsecção 3.2. Estas restrições têm como finalidade garantir a estabilidade do veículo ao longo de toda a rota, tendo em conta todas as paragens e respetivas descargas de carga em cada um dos postos de combustível.

$$PD_j \geq W_j \times (TWB - S) + U_R \times (TWB - H_u) - FTR_{max} \times TWB, \quad \forall j \in J \quad (3.19)$$

$$PD_j \leq -W_j \times S + RTR_{max} \times TWB - U_R \times H_u, \quad \forall j \in J \quad (3.20)$$

$$W_j \leq W_{max}, \quad \forall j \in J \quad (3.21)$$

$$PD_j \leq W_j \times (TWB - S) + U_R \times (TWB - H_u) - PCF \times (U_R + W_j) \times TWB, \quad \forall j \in J \quad (3.22)$$

$$PD_j \geq PCT \times (U_R + W_j) \times TWB - W_j \times S - U_R \times H_u, \quad \forall j \in J \quad (3.23)$$

As restrições (3.19 e 3.20) garantem que o veículo circula dentro dos limites de carga sob cada um dos eixos, anterior e posterior, respetivamente. As restrições (3.21) garantem que a carga máxima não ultrapassa o máximo estático imposto por lei. As restrições (3.22 e 3.23) garantem os mínimos de carga no apoio frontal (de modo a proporcionar carga no eixo direcional) e no apoio traseiro (de modo a proporcionar uma percentagem de carga no eixo trator), de forma a garantir estabilidade ao longo da viagem.

Domínio das variáveis de decisão:

As restrições (3.24 e 3.25) definem o domínio das variáveis de decisão utilizadas no modelo.

$$\gamma_j, Max_\gamma, \alpha_{ckj}, wgt_{cj}, PD_j, W_j \geq 0, \quad \forall c \in C, \forall k \in K, \forall j \in J \quad (3.24)$$

$$Y_{ckj}, T_{ck} \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C, \forall k \in K, \forall j \in J \quad (3.25)$$

O modelo permite a validação de um conjunto de dados de distribuição de combustível, que consiste numa determinada procura de cada produto em cada posto. Os dados introduzidos consistem numa rota já idealizada, com um certo custo e distância percorrida. São então processados pelo modelo matemático e este valida se a rota introduzida é viável quanto à estabilidade dinâmica do veículo. Para além de validar se a rota é possível, tendo em conta os limites anteriormente mencionados, o modelo define também como deverá ser feita a distribuição de produtos por compartimento e garante que o centro de gravidade da carga encontra-se dentro da área delimitada pelo *LDD*.

TESTES COMPUTACIONAIS

4.1 Introdução

4.2 Descrição das instâncias utilizadas

4.3 Extensão ao modelo a diferentes Funções
Objetivo

4.4 Análise dos tempos computacionais

4 TESTES COMPUTACIONAIS

4.1 Introdução

A partir do modelo matemático desenvolvido foram realizados testes computacionais com a finalidade de validar e aplicar o mesmo em diferentes contextos, considerando diferentes objetivos. Primeiramente será validado o modelo, e depois será realizada uma análise de sensibilidade ao modelo considerando diferentes funções objetivo. O modelo foi desenvolvido na íntegra utilizando o *IBM ILOG Cplex Studio 22.1.0*. Os testes computacionais correram num *CPU Intel i7-770HQ* de *3.80 GHz* com *16GB* de memória RAM.

4.2 Descrição das instâncias utilizadas

De forma a validar o modelo matemático, foram utilizados dados do artigo "A novel two-phase approach for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles: a case study on fuel delivery" de Chowmali & Sukto (2020). Os dados consistem num grupo de clientes (postos de combustível) com uma determinada procura de vários produtos (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3). A capacidade máxima de cada compartimento de cada um dos 3 veículos é também apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.1 – Procura em litro dos postos de combustível da rota 1

Tipo de Produto	Posto de Combustível							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Gasóleo	4500	6000	3000	5000	2000	4500	4000	4000
Gasolina 95	2500	500	1000	0	2000	2000	0	0
Gasolina 91	500	1000	0	0	1000	500	0	0

Tabela 4.2 – Procura em litro dos postos de combustível da rota 2

		Posto de Combustível					
Tipo de Produto		1	2	3	4	5	6
Gasóleo		4000	3500	12000	4500	6500	5500
Gasolina 95		0	5500	0	3000	0	0
Gasolina 91		0	0	0	0	0	0

Tabela 4.3 – Procura em litro dos postos de combustível da rota 3

		Posto de Combustível					
Tipo de Produto		1	2	3	4	5	6
Gasóleo		9000	6000	14500	6000	4000	5500
Gasolina 95		0	0	0	0	0	0
Gasolina 91		0	0	0	0	0	0

Tabela 4.4 – Capacidade em litro de cada compartimento

		Capacidade de cada compartimento							
Tipo de Veículo		1	2	3	4	5	6	7	Total
1		9000	6000	6000	6000	6000	6000	8000	47000
2		9000	8000	7000	7000	7000	7000	0	45000
3		9000	8000	7000	7000	7000	7000	0	45000

Os valores utilizados para a construção do *LDD* do caso em estudo serão os apresentados na Tabela 4.5. Os dados do veículo utilizados foram selecionados tendo em conta o que seria mais apropriado para este tipo de problema com esta dimensão de cargas.

Tabela 4.5 – Parâmetros do veículo utilizado (Vasant Fabricators e LPG Gas Tanker Truck)

Parâmetros	Valor
FTR_{max}	20000 kg
RTR_{max}	27000 kg
TWB	8,8 m
UR	7000 kg
H_u	3,2 m
S	1 m
W_{max}	38250 kg
PCF	20 %
PCT	20 %

Serão testadas 3 instâncias, e cada uma delas utilizará apenas 1 veículo (A primeira utilizará o primeiro veículo, a segunda o segundo e a terceira o terceiro).

Durante a validação os parâmetros CTT_{jk} (Capacidade total do tanque de produto k no posto de combustível j em litro) e CAT_{jk} (Capacidade atual do tanque de produto k no posto de combustível j em litro) tomaram valores muito grandes e o valor zero para cada cliente j e tipo de produto k , respetivamente.

De forma a dar início à validação foram introduzidos todos os dados do problema. O modelo foi aplicado e nestes três primeiros conjuntos de dados foi possível chegar a uma solução válida para as três instâncias. Dos resultados foi possível concluir que as restrições de aprovisionamento não apresentavam nenhum tipo de problema assim como as restrições de carga. É de salientar que a situação mais difícil de respeitar será sempre à saída do centro de distribuição, quando o veículo se encontra com a carga máxima, logo esta situação será a representada.

Através da função objetivo com o intuito de minimizar a quantidade máxima de compartimentos utilizados para cada cliente obtivemos como resultado: 3 compartimentos para a rota 1, 2 compartimentos para a rota 2 e 2 compartimentos para a rota 3.

Abaixo, na Figura 4.1, observa-se o comportamento da carga das 3 rotas à saída do centro de distribuição quanto ao *LDD*.

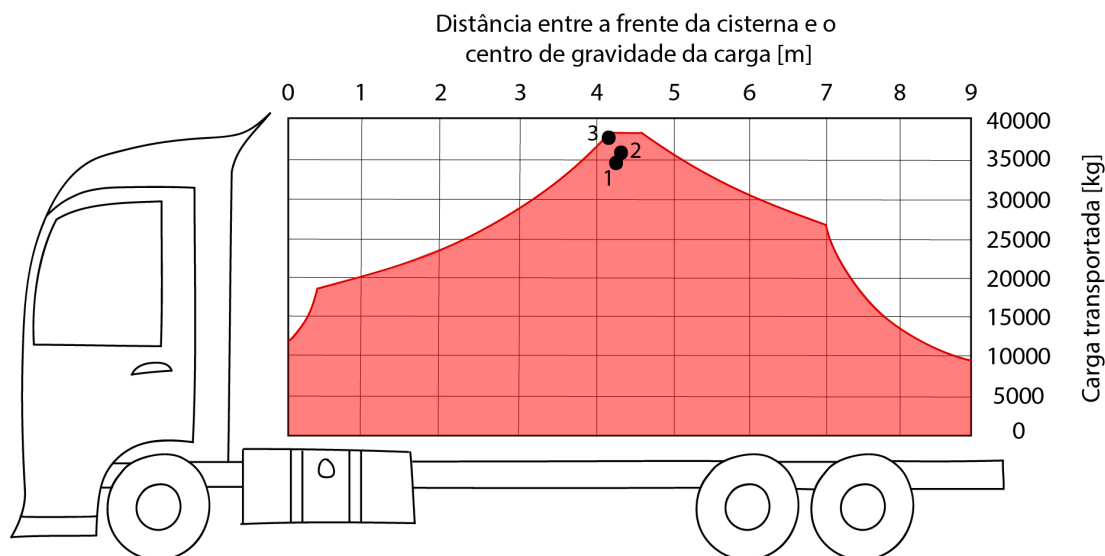


Figura 4.1 – Comportamento do caso crítico de cada rota no LDD

Através da análise do *LDD* é possível concluir que as duas primeiras rotas ainda se encontram afastadas dos limites restringidos pelas restrições de carga, ou seja, ainda seria possível entregar mais combustível com estas configurações dos veículos. No caso da terceira rota, que se encontra próxima ao limite, concluímos que a situação aproxima-se da carga máxima no apoio dianteiro do veículo.

Damos então como validado o modelo. É possível, através das instâncias apresentadas respeitar as restrições de carga desenvolvidas ao longo deste trabalho.

Na Figura 4.2 é possível visualizar como ficaria a distribuição do combustível por compartimento no caso da segunda rota, utilizando o veículo número 2. É de salientar que a primeira paragem é no cliente 1 ($j=1$) e a última paragem no cliente 6 ($j=6$). Apenas o primeiro compartimento transporta combustível do tipo 2 enquanto todos os outros transportam combustível do tipo 1. Vemos ainda a localização do centro de gravidade de toda a carga e um pequeno espaço de 500 litros por preencher no primeiro compartimento. Como explicado anteriormente, esta solução não seria a mais lucrativa, pois as viagens são mais rentáveis quando o veículo sai do centro de distribuição com a cisterna completamente lotada e neste caso o veículo ainda sai do centro de distribuição com algum espaço vazio.

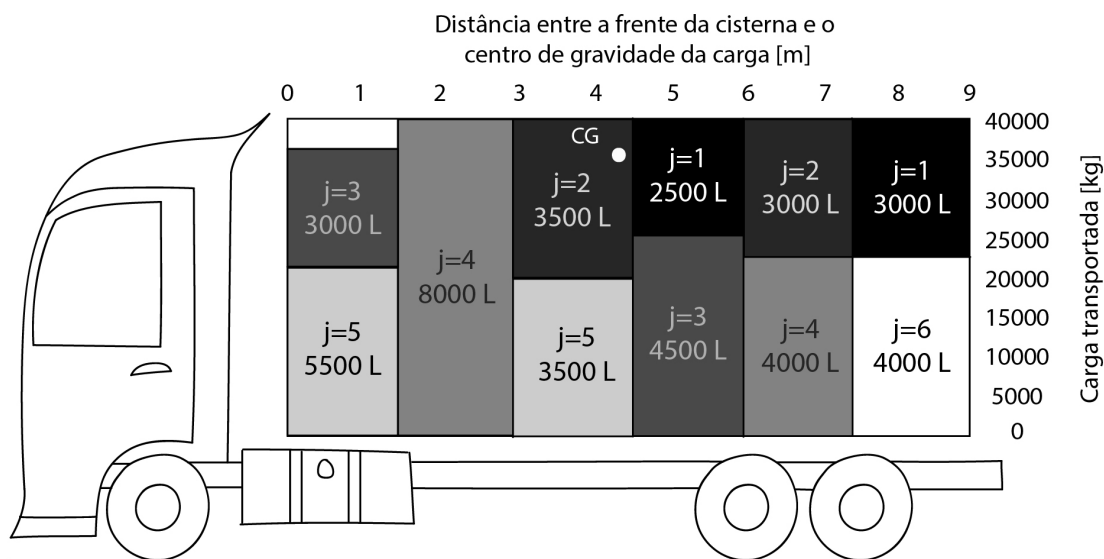


Figura 4.2 – Exemplo da alocação dos compartimentos (rota 2)

4.3 Extensão ao modelo a diferentes Funções Objetivo

Mantendo o mesmo conjunto de restrições mas alterando a função objetivo é possível mudar completamente o foco do problema. Anteriormente, o objetivo consistia em minimizar o número de compartimentos alocados a um único posto de combustível, ajudando assim a diminuir os tempos de descarga. Posteriormente serão abordadas duas situações: maximizar a quantidade entregue e minimizar a distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga. No primeiro caso o objetivo é tornar as viagens o mais rentáveis possível, e no segundo será assegurar uma característica adicional à segurança da viagem.

Em ambos os casos estudados foi alterado o valor dos parâmetros CTT_{jk} . Os valores deixaram de ser números muito grandes e passaram a assumir o valor de 150% da procura da respetiva instância testada.

4.3.1 Maximizar quantidade entregue

Abordando o problema de outra maneira, é possível maximizar a quantidade de combustível entregue, maximizando assim os lucros associados. Como visto na revisão bibliográfica é mais vantajoso o veículo sair o mais carregado possível, mesmo que o valor entregue exceda a procura. Isto pode suceder porque cada posto de combustível tem tanques para cada tipo de produto, e ao sabermos a capacidade atual e a capacidade máxima desses tanques podemos gerar soluções que cumpram estes limites.

Com os dados utilizados anteriormente, assim como o mesmo veículo, foi alterada a função objetivo, passando a mesma a maximizar o sumatório de quantidade de combustível entregue:

$$\text{Max} \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J wgt_{cj}$$

Abaixo na Tabela 4.6 serão comparados os resultados da alteração da função objetivo (minimizar a quantidade de compartimentos atribuídos a um certo cliente e maximizar a quantidade de combustível entregue). Ao maximizar a quantidade de combustível entregue verificou-se um aumento da quantidade transportada em duas das três rotas.

Tabela 4.6 – Resultados da maximização da quantidade de combustível entregue

Rota	Min. nº de compartimentos			Max. quantidade entregue		
	1	2	3	1	2	3
Quantidade (litro)	44000	44500	45000	45500	45000	45000
Carga (kg)	36410	37007,5	38025	37572,5	37395	38025

Para a primeira rota foi assegurado um aumento de 1500 litros ou 1162,5 kg, na segunda rota foi entregue mais 500 litros ou 387,5 kg. Na terceira rota a quantidade entregue não se viu alterada. Este último caso justifica-se devido à quantidade já transportada utilizando a função objetivo anterior. A quantidade transportada já era igual ao valor máximo transportado pelo veículo 3 (45000 litros), logo, de forma a satisfazer a procura seria necessário transportar exatamente a carga máxima admissível ao veículo. E o que se conclui é que o valor de carga transportado anteriormente seria o mesmo ao maximizar a quantidade entregue.

Abaixo, na Figura 4.3 está representado o *LDD* para o caso mais crítico (à saída do centro de distribuição) para cada uma das rotas, no caso da maximização da quantidade de combustível entregue.

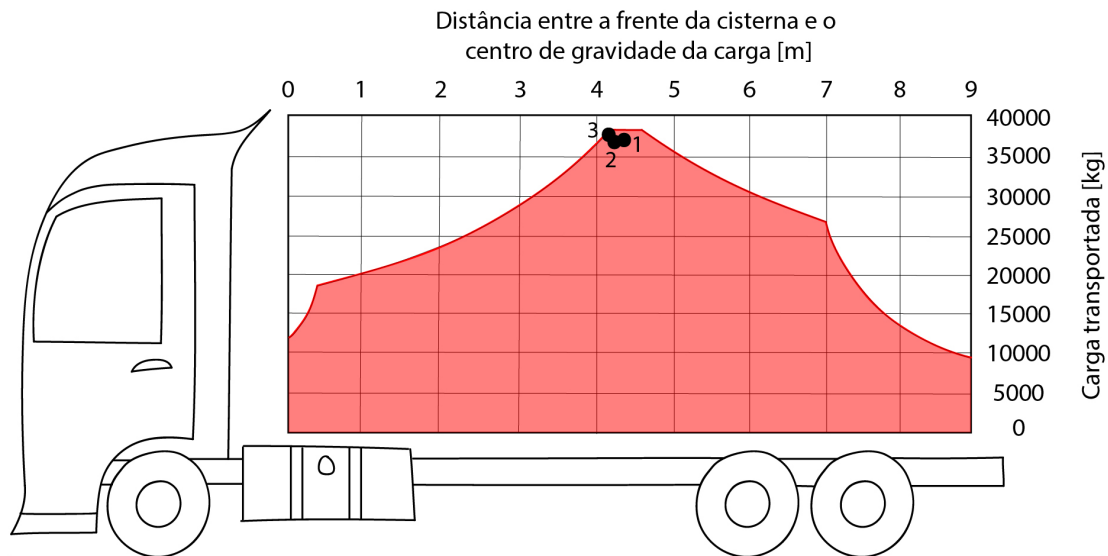


Figura 4.3 – Comportamento do caso crítico de cada rota no LDD ao maximizar a quantidade entregue

Comparativamente às situações críticas anteriores (entende-se por situação crítica o momento de saída do centro de distribuição, quando a carga no veículo é máxima e a posição do centro de gravidade mais se aproxima dos limites impostos pelo *LDD*), os centros de gravidade da rota 1 e 2 alteraram a sua posição, devido ao aumento de combustível transportados nestas situações. Situam-se agora mais acima que anteriormente, mas ainda afastadas dos limites impostos pelo *LDD*.

4.3.2 *Minimizar a distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga*

Com o intuito de melhorar ainda mais o fator segurança foi testada a hipótese de minimizar a distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga. Segundo (Gilbert et al., 2008), como no caso dos semi-reboques, quanto mais próximo possível o centro de gravidade da carga estiver do apoio dianteiro menos oscilações no apoio traseiro ocorrerão. Isto torna o veículo mais estável, mais previsível em situações de derrapagem e no geral mais seguro para o transporte de matérias perigosas.

De forma a atingir este propósito foi alterada a função objetivo. Utilizando os mesmos dados do primeiro caso, assim como o mesmo veículo, a função objetivo passando a minimizar o somatório da variável PD_j :

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J PD_j$$

Ao minimizar esta variável, consequentemente reduzimos a distância entre a

frente da cisterna e o centro de gravidade da carga ao longo de toda a rota. Isto porque, PD_j resulta da multiplicação da carga pela distância que queremos reduzir. A carga tem um valor mínimo a ser entregue (a procura tem de ser satisfeita), logo a única variável livre será a distância, que queremos reduzir.

Neste caso, foi entregue exatamente a mesma quantidade de combustível que ao utilizar a função objetivo que minimiza a quantidade de compartimentos alocados a cada posto de combustível. Isto sucede pois não há nenhuma motivação para o modelo transportar mais combustível que o mínimo (procura de cada posto de combustível j), assim como na primeira função objetivo.

4.3.2.1 Comparação do posicionamento dos centros de gravidade para as diferentes funções objetivo

De forma a visualizar cada uma das funções objetivo foi elaborado um gráfico que consiste na evolução do centro de gravidade da carga ao longo de uma viagem. A rota escolhida foi a rota 2, e estão representados os resultados das três funções objetivo na Figura 4.4.

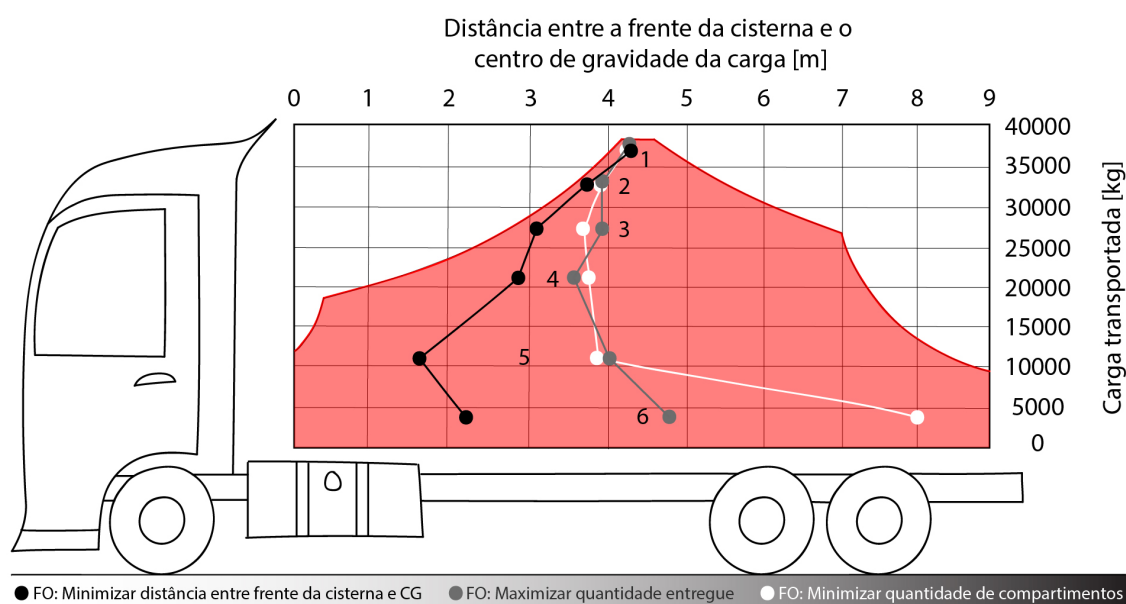


Figura 4.4 – Comparação do posicionamento do centro de gravidade para cada função objetivo

Na figura acima vemos 3 conjuntos de pontos, a numeração é a mesma para os 3 conjuntos pois estes algarismos representam onde é que cada centro de gravidade fora calculado. O ponto 1 representa a saída do centro de distribuição, o ponto 2 já mostra o centro de gravidade depois de ter descarregado no primeiro cliente. Assim sucessivamente até ao ponto 6, onde temos apenas a carga destinada ao último cliente.

Os pontos de cor branca são do caso inicial, onde o objetivo era minimizar o

número de compartimentos atribuídos a cada posto de combustível. A cinza está representado o caso onde maximizamos a quantidade entregue e a negro observamos o comportamento dos resultados quando minimizamos a distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga. Os pontos cinzentos situam-se um pouco acima dos pontos brancos, isto devido à carga adicional que transportamos neste caso. Os pontos negros situam-se muito à esquerda de quaisquer outros, derivado à função objetivo utilizada.

4.4 Análise dos tempos computacionais

O modelo matemático apresentou tempos de processamento baixos, informação visível na Tabela 4.7. A média do tempo de processamento é de 3,22 *s* e o desvio padrão de 0,54 *s*.

Tabela 4.7 – Tempos de processamento

	Rota 1	Rota 2	Rota 3
F.O. 1	4,72 <i>s</i>	3,14 <i>s</i>	3,27 <i>s</i>
F.O. 2	3,10 <i>s</i>	2,93 <i>s</i>	2,91 <i>s</i>
F.O. 3	2,98 <i>s</i>	2,97 <i>s</i>	2,95 <i>s</i>

De forma a validar esta análise teríamos de testar mais instâncias, com a finalidade de termos uma avaliação do desempenho do modelo mais refinada.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

5.2 Propostas de trabalhos futuros

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo criar um modelo que garantisse a devida estabilidade da carga ao longo do abastecimento dos postos de combustível. No presente capítulo será elaborada a análise crítica de todo o trabalho desenvolvido ao longo da Dissertação, assim como considerações para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Após uma extensa revisão bibliográfica foram adquiridas noções anteriormente ausentes, desde a energia consumida pelos transportes rodoviários em Portugal até aos modelos matemáticos utilizados ao longo dos anos com a finalidade de resolver o problema da distribuição de combustível. O trabalho desenvolvido posteriormente teve como base os conhecimentos adquiridos no segundo capítulo.

O modelo matemático elaborado demonstrou a capacidade de cumprir os objetivos propostos com sucesso. Tendo como base a legislação abordada e as limitações dos fabricantes de veículos de transporte de matérias perigosas foi possível garantir o aprovisionamento e a segurança da carga transportada ao longo de toda a rota percorrida.

A extensão ao modelo a funções objetivo diferentes permitiu ainda adicionar novas finalidades ao modelo, ajustando-o às necessidades do utilizador. O modelo pode ser adaptado para minimizar custos de distribuição (ao minimizar a quantidade de compartimentos atribuídos a cada posto de combustível), maximizar o lucro da distribuição (quando a função objetivo é maximizar a quantidade entregue, visto que a viagem é o mais lucrativa possível quando o veículo sai do centro de distribuição completamente carregado) ou melhorar, ainda mais, a segurança (através da minimização da distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga). Estas três vertentes são exemplos práticos da flexibilidade do modelo matemático elaborado, que se conforma aos objetivos de quem o utiliza.

A última função objetivo utilizada (que minimiza a distância entre a frente da cisterna e o centro de gravidade da carga) ao longo da literatura revista não é considerada, mas tem grande impacto na circulação do veículo em segurança. Quanto mais próximo do apoio traseiro a posição do centro de gravidade estiver maior será

o risco de sobre-viragem em curva (comportamento indesejado e perigoso, quando o apoio traseiro de um veículo perde tração). Ao minimizar esta distância são minimizadas as oscilações originadas pela carga no apoio traseiro do veículo, diminuindo o risco deste comportamento.

Conclui-se que o desempenho do modelo matemático é elevado, independentemente da função objetivo utilizada. De forma a avaliar melhor o desempenho teriam de ser realizados testes computacionais mais extensos.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

Com o intuito de continuar o desenvolvimento ou extensão do modelo seriam ponderadas as seguintes propostas de trabalho futuro:

- O modelo matemático desenvolvido poderia ser estendido de modo a otimizar simultaneamente as rotas e a atribuição dos compartimentos, garantindo o cumprimento das restrições de segurança e a legislação;
- Integração com uma metodologia que otimize as rotas e o modelo proposto faria validação da segurança e a atribuição de compartimentos;
- Realizar testes computacionais exaustivos.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS
FONTES DE INFORMAÇÃO

6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Al-Hinai, N., & Triki, C. (2020, 3). A two-level evolutionary algorithm for solving the petrol station replenishment problem with periodicity constraints and service choice. *Annals of Operations Research*, 286, 325-350. doi: 10.1007/s10479-018-3117-3
- Avella, P., Boccia, M., & Sforza, A. (2004, 1). Solving a fuel delivery problem by heuristic and exact approaches. *European Journal of Operational Research*, 152, 170-179. doi: 10.1016/S0377-2217(02)00676-8
- Bektaş, T., & Laporte, G. (2011, 9). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45, 1232-1250. doi: 10.1016/j.trb.2011.02.004
- Benantar, A., Ouafi, R., & Boukachour, J. (2016, 12). A petrol station replenishment problem: new variant and formulation. *Logistics Research*, 9, 6. doi: 10.1007/s12159-016-0133-z
- Benantar, A., Ouafi, R., & Boukachour, J. (2020, 1). An improved tabu search algorithm for the petrol-station replenishment problem with adjustable demands. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 58, 17-37. doi: 10.1080/03155986.2019.1607806
- Boctor, F. F., Renaud, J., & Cornillier, F. (2011, 1). Trip packing in petrol stations replenishment. *Omega*, 39, 86-98. doi: 10.1016/j.omega.2010.03.003
- Brown, G. G., Ellis, C. J., Graves, G. W., & Ronen, D. (1987, 2). Real-time, wide area dispatch of mobil tank trucks. *Interfaces*, 17, 107-120. doi: 10.1287/inte.17.1.107
- Brown, G. G., & Graves, G. W. (1981, 1). Real-time dispatch of petroleum tank trucks. *Management Science*, 27, 19-32. doi: 10.1287/mnsc.27.1.19
- Campbell, A. M., & Wilson, J. H. (2014, 1). Forty years of periodic vehicle routing. *Networks*, 63, 2-15. doi: 10.1002/net.21527
- Carotenuto, P., Giordani, S., & Celani, D. (2017). Planning retail distribution of fuel oils. *Transportation Research Procedia*, 27, 484-491. doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.017

- Chowmali, W., & Sukto, S. (2020, 1). A novel two-phase approach for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles: a case study on fuel delivery. *Decision Science Letters*, 9, 77-90. doi: 10.5267/j.dsl.2019.7.003
- Chowmali, W., & Sukto, S. (2021, 10). A hybrid fja-alns algorithm for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles for the fuel delivery problem. *Decision Science Letters*, 10, 497-510. doi: 10.5267/j.dsl.2021.6.001
- Cornillier, F., Boctor, F., & Renaud, J. (2012, 7). Heuristics for the multi-depot petrol station replenishment problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 220, 361-369. doi: 10.1016/j.ejor.2012.02.007
- Cornillier, F., Boctor, F. F., Laporte, G., & Renaud, J. (2008a, 5). An exact algorithm for the petrol station replenishment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 59, 607-615. doi: 10.1057/palgrave.jors.2602374
- Cornillier, F., Boctor, F. F., Laporte, G., & Renaud, J. (2008b, 12). A heuristic for the multi-period petrol station replenishment problem. *European Journal of Operational Research*, 191, 295-305. doi: 10.1016/j.ejor.2007.08.016
- Cornillier, F., Laporte, G., Boctor, F. F., & Renaud, J. (2009, 3). The petrol station replenishment problem with time windows. *Computers Operations Research*, 36, 919-935. doi: 10.1016/j.cor.2007.11.007
- Decreto lei no 132/2017 de 11 de outubro de planeamento e das infraestruturas. (2017). Retrieved from www.dre.pt
- Decreto lei no 19-a/2014 de 7 de fevereiro do ministério da economia. (2014). Retrieved from www.dre.pt
- DGEG. (2021, 11). *Balanço energético nacional 2020*. Retrieved from <https://www.dgeg.gov.pt/media/hmqkkm2m/dgeg-ben-2020.pdf>
- ERSE. (2021). *Análise do mercado de combustíveis líquidos rodovias 2018-2020*. Retrieved from [Garantia da estabilidade da carga no abastecimento de postos de combustível](https://www.erse.pt/media/1uiff13h/relat\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{o\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\let\begin\group\let\typeout\protect\begin\group\def\MessageBreak{\Omega(Font)}\let\protect\immediate\write\m@ne{LaTeXFontInfo: oninputline576}\end\group\end\group\relax\let\ignorespaces\relax\accent19o\egroup\spacefactor\accent@spacefactor\orio-an\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{a\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\let\begin\group\let\typeout\protect\begin\group\def\MessageBreak{\Omega(Font)}\let\protect\immediate\write\m@ne{LaTeXFontInfo: oninputline576}\end\group\end\group\relax\let\ignorespaces\relax\accent19a\egroup\spacefactor\accent@spacefactor\lise-do-mercado-de-combust\C3%ADveis-1\C3%ADquidos-rodovi\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{a\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\let\</p>
</div>
<div data-bbox=)

```
begingroup\let\typeout\protect\begin{group}\def\MessageBreak{\Omega(Font)}\let\protect\immediate\write\m@ne{LaTeXFontInfo:onlineinputline576.}\endgroup\endgroup\relax\let\ignorespaces\relax\accent19a\egroup\spacefactor\accent@spacefactorrios.pdf
```

- Febriandini, I. F., Yuniaristanto, & Sutopo, W. (2020, 10). Multi-compartment vehicle routing problem to find the alternative distribution route of petroleum product delivery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 943, 012039. doi: 10.1088/1757-899X/943/1/012039
- Fisher, M. L., & Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11, 109-124. doi: 10.1002/net.3230110205
- Gilbert, M. G., Godrick, D. A., & Klein, R. H. (2008). The effect of longitudinal center of gravity position on the sway stability of a small cargo trailer. In *Volume 16: Safety engineering, risk analysis and reliability methods*. ASMEDC. doi: 10.1115/imece2008-66022
- Hamdi, K., Labadie, N., & Yalaoui, A. (2014, 12). Vehicle routing problem for hazardous materials transportation: An overview. In (p. 632-636). IEEE. doi: 10.1109/IEEM.2014.7058715
- Holeczek, N. (2019, 4). Hazardous materials truck transportation problems: A classification and state of the art literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 305-328. doi: 10.1016/j.trd.2019.02.010
- Islam, M. M., Rahman, M., Islam, M., & Ghosh, S. (2015). *Solving capacitated vehicle routing problem by using heuristic approaches: A case study* (Vol. 3).
- Liu, L., Li, J., Zhou, L., Fan, T., & Li, S. (2021, 8). Research on route optimization of hazardous materials transportation considering risk equity. *Sustainability*, 13, 9427. doi: 10.3390/su13169427
- Liu, W.-Y., Lin, C.-C., Chiu, C.-R., Tsao, Y.-S., & Wang, Q. (2014, 7). Minimizing the carbon footprint for the time-dependent heterogeneous-fleet vehicle routing problem with alternative paths. *Sustainability*, 6, 4658-4684. doi: 10.3390/su6074658
- Ma, C., Li, Y., He, R., Duan, G., Sun, L., & Qi, B. (2012). New optimisation model and fuzzy adaptive weighted genetic algorithm for hazardous material transportation. *International Journal of Computing Science and Mathematics*, 3, 341. doi: 10.1504/IJCSM.2012.051621
- Mahmoudabadi, A., Farokhi, R., & Fattahi, A.-A. (2016, 12). Developing a tolerated risk model for solving routing-locating problem in hazardous material management. *Journal of Intelligent Transportation and Urban Planning*, 4, 53-61. doi: 10.18005/ITUP0401006
- Masoud, S., Kim, S., & Son, Y.-J. (2020, 10). Mitigating the risk of hazardous materials transportation: A hierarchical approach. *Computers Industrial Engineering*, 148, 106735. doi: 10.1016/j.cie.2020.106735

- Mubiru, K., Christopher, S., Ssempijja, M. N., Mubiru, K. P., Senfuka, C., & Ssempijja, M. N. (2020). Stochastic joint replenishment model for the petroleum supply chain. *International Journal of Academic Multidisciplinary Research*, 4, 75-82.
- Ng, W. L., Leung, S. C. H., Lam, J. K. P., & Pan, S. W. (2008, 9). Petrol delivery tanker assignment and routing: a case study in hong kong. *Journal of the Operational Research Society*, 59, 1191-1200. doi: 10.1057/palgrave.jors.2602464
- Ostermeier, M., Henke, T., Hübner, A., & Wäscher, G. (2021, 8). Multi-compartment vehicle routing problems: State-of-the-art, modeling framework and future directions. *European Journal of Operational Research*, 292, 799-817. doi: 10.1016/j.ejor.2020.11.009
- Ostermeier, M., & Hübner, A. (2018, 9). Vehicle selection for a multi-compartment vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 269, 682-694. doi: 10.1016/j.ejor.2018.01.059
- Parsafard, M., Esmael, A., Masoud, K., Mohammadreza, N., & Li, X. (2015, 1). Practical approach for finding optimum routes for fuel delivery trucks in large cities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2478, 66-74. doi: 10.3141/2478-08
- Popović, D., Bjelić, N., & Radivojević, G. (2011). Simulation approach to analyse deterministic irp solution of the stochastic fuel delivery problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 273-282. doi: 10.1016/j.sbspro.2011.08.033
- Ramos, A. G., Silva, E., & Oliveira, J. F. (2018). A new load balance methodology for container loading problem in road transportation. , 266(3), 1140-1152. doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.050
- Regulamento (ue) 2018/858 do parlamento europeu.* (2018). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0858>
- Shao, Y., & Dessouky, M. (2020, 4). A routing model and solution approach for alternative fuel vehicles with consideration of the fixed fueling time. *Computers Industrial Engineering*, 142, 106364. doi: 10.1016/j.cie.2020.106364
- Shen, X., Yan, Y., Li, X., Xie, C., & Wang, L. (2014, 10). Analysis on tank truck accidents involved in road hazardous materials transportation in china. *Traffic Injury Prevention*, 15, 762-768. doi: 10.1080/15389588.2013.871711
- Silva, E., Ramos, A. G., & Oliveira, J. F. (2018). Load balance recovery for multi-drop distribution problems: A mixed integer linear programming approach. , 116, 62-75. doi: 10.1016/j.trb.2018.08.001
- Triki, C. (2013, 12). Solution methods for the periodic petrol station replenishment problem. *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 10, 69. doi: 10.24200/tjer.vol10iss2pp69-77
- Vidović, M., Popović, D., & Ratković, B. (2014, 1). Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery. *International Journal of Production Economics*, 147, 593-604. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.04.034

-
- Wang, L., Kinable, J., & van Woensel, T. (2020, 6). The fuel replenishment problem: A split-delivery multi-compartment vehicle routing problem with multiple trips. *Computers Operations Research*, *118*, 104904. doi: 10.1016/j.cor.2020.104904
- Wei, X.-T., Liao, Q., Zhang, H.-R., Liang, Y.-T., Wang, B.-H., Xu, N., & Yuan, M. (2021, 2). Milp formulations for highway petrol station replenishment in initiative distribution mode. *Petroleum Science*, *18*, 994-1010. doi: 10.1007/s12182-021-00551-4
- Xu, G., & Lyu, Q. (2021, 4). Vehicle routing problem for collaborative multidepot petrol replenishment under emergency conditions. *Journal of Advanced Transportation*, *2021*, 1-20. doi: 10.1155/2021/5531500
- Xu, G., Xu, M., Wang, Y., Liu, Y., & Lv, Q. (2020, 10). Collaborative multidepot petrol station replenishment problem with multicompartments and time window assignment. *Journal of Advanced Transportation*, *2020*, 1-22. doi: 10.1155/2020/8843397
- Yahyaoui, H., Kaabachi, I., Krichen, S., & Dekdouk, A. (2020, 12). Two metaheuristic approaches for solving the multi-compartment vehicle routing problem. *Operational Research*, *20*, 2085-2108. doi: 10.1007/s12351-018-0403-4
- Yilmaz, Z., Erol, S., & Aplak, H. S. (2016). Transportation of hazardous materials (hazmat) a literature survey. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *22*, 39-53. doi: 10.5505/pajes.2015.62134

