

Avaliação Energética da Alocação de Autocarros a Rotas Específicas

Bernardo Leiria Ribeiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Dr. Patrícia de Carvalho Baptista

Prof. Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri

Presidente: Prof. Edgar Caetano Fernandes

Orientador: Prof. Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Vogal: Prof. António Luís Nobre Moreira

Novembro 2018

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer a todos os que acompanharam e, de uma maneira ou de outra, ajudaram no meu percurso e sucesso académico, tanto ao longo destes anos, como na realização desta dissertação.

Agradeço em primeiro lugar ao Professor António Luís Moreira, pela oportunidade de ter realizado o estágio no âmbito do programa Galp21.

Agradeço também aos meus orientadores, Patrícia Baptista e Gonçalo Duarte, pelo apoio e suporte ao longo desta dissertação.

Um agradecimento à empresa Rodoviária de Lisboa, em especial ao Dr. João Cunha, por todo o suporte e orientação dada, bem como a todos os que disponibilizaram o seu tempo para me acompanhar e ajudar sempre que foi necessário.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer à minha família, em especial à minha mãe e à minha avó, por toda a força, carinho e exemplo que sempre me deram, ao meu pai pelo exemplo como homem que é para mim e à minha irmã por me apoiar nas minhas decisões.

Resumo

O sector dos transportes, em Portugal, representa mais de 36.9% [1] do consumo de energia final, onde os transportes públicos representam menos de 9% [2] do consumo utilizado em transportes.

Pretendeu-se estudar e simular o consumo de energia de autocarros em diferentes rotas, de modo a alocá-los obtendo uma melhor eficiência energética. Foi desenvolvida uma ferramenta, através de um procedimento experimental, onde foram feitas medições em viaturas da Rodoviária de Lisboa em condições reais. A metodologia apresentada nesta dissertação foi calibrada e validada, apresentando um erro médio de 4.3%.

Concluiu-se que a alocação de viaturas tem um potencial de redução de consumo de 3.8%, para a presente realidade da empresa, considerando apenas viaturas já existentes, não implicando qualquer investimento financeiro e representando uma redução de cerca de 805 toneladas de emissões de CO₂, 1946kg de CO, 8565kg de NO_x e 241kg de partículas.

Por outro lado, foi avaliada a situação ideal, em que se promoveria a substituição de viaturas Citaro com motorizações OM 457, por outras com motorizações OM 906, as quais teriam potência suficiente para realizar os trajectos. Com a substituição de viaturas, o potencial de redução de consumo seria de 9.3%, obtendo-se uma redução de 1849 toneladas de emissões de CO₂, 4704kg de CO, 20711kg de NO_x e 583kg de partículas.

A introdução desta ferramenta na empresa tem potencial para uma melhor alocação das viaturas existentes, bem como para facilitar na escolha para a aquisição de novas viaturas e respetiva distribuição.

Palavras-chave: veículos pesados de passageiros, alocação de viaturas, combustíveis, eficiência energética, transportes

Abstract

In Portugal, the transport sector represents more than 36.9% [1] of the final energy consumption, with public transports contributing with less than 9% [2] of the consumption used in transports.

This study aims at simulating and assessing the energy consumption of buses in several routes, in order to allocate them, obtaining a better energy efficiency. A tool was created through an experimental proceeding, where measurements were made in real driving conditions with vehicles of "Rodoviária de Lisboa". The methodology here presented was calibrated and validated, comparing the estimated energy consumption with the real energy consumption for 20 travels, showing a 4.3% average error.

A more adequate vehicles' allocation has the potential of reducing energy consumption by 3.8%, for the present reality of the company, allocating only the existing vehicles, without any extra investment. This would represents a reduction of about 805 tons of CO₂ emissions, 1946kg of CO, 8556kg of NO_x and 241kg of particles.

On the other hand, a more adequate situation was evaluated, where replacing the Citaro vehicle with the OM 457 motorization by others with the OM 906 motorization, since this will have enough power to make the courses. The potential reduction of fuel consumption would be of 9.3%, reducing 1849 tons of CO₂ emissions, 4704kg of CO, 20711kg of NO_x and 583kg of particles.

The introduction of this tool in the company would enabled a better allocation of the existing vehicles, and also makes the choice of new vehicles and its allocations easier.

Keywords: heavy passenger vehicles, vehicles allocation, fuels, energy efficiency, transports

Índice

1. Introdução.....	10
1.1. Enquadramento	10
1.2. Objectivo.....	13
1.3. Organização da dissertação.....	14
2. Estado da arte.....	16
3. Metodologia de aquisição e análise de dados.....	24
3.1. Caso de estudo.....	24
3.2. Metodologia de recolha e de análise de dados.....	27
3.2.1. Procedimento experimental para a recolha de dados.....	28
3.2.2. Metodologia de análise de dados.....	31
3.3. Metodologia para estimar curvas de consumo.....	33
4. Descrição de ferramenta de alocação	36
5. Resultados.....	39
5.1. Validação da ferramenta e resultados da caracterização.....	39
5.2. Medidas de alocação.....	45
5.2.1. Análise dos critérios seleccionados	45
5.2.2. Avaliação das linhas de tendência entre os vários critérios e o consumo de combustível	49
5.3. Aplicação da alocação das viaturas	55
5.3.1. Hipótese de alocação 1.....	56
5.3.2. Hipótese de alocação 2.....	58
5.3.3. Hipótese de alocação 3.....	59
6. Conclusões e trabalho futuro.....	61
Bibliografia.....	63

Índice de tabelas

Tabela 1 - Consumo energético por tipo de veículo (MJ/pass.km) [3]	10
Tabela 2 - Diferenças entre meios de transportes citadinos público	11
Tabela 3 - Emissões <i>standard</i> para motores Diesel de Pesado - Normas EURO	13
Tabela 4 - Emissões de CO ₂ equivalente por quilómetro dos diversos tipos de autocarros [13]	20
Tabela 5 - Viaturas Mercedes-Benz Citaro testadas [32], [33]	25
Tabela 6 – resumo das viagens de ensaio efectuadas	27
Tabela 7 - Variáveis necessárias para a caracterizar as viaturas	28
Tabela 8 - Viagens realizadas com cada viatura	31
Tabela 9 - Valores das constantes para a cálculo de STP	32
Tabela 10 - Dados dos testes ao <i>ralenti</i>	35
Tabela 11 - Valores médios de emissão de poluentes [37]	38
Tabela 12 - Viagens realizadas com as diferentes viaturas, a verde encontram-se os valores dos erros do par de viagens escolhido para a caracterização de cada viatura	40
Tabela 13 - Resultado dos coeficientes de cada viatura	41
Tabela 14 - Consumo de combustível estimado para cada viatura em cada viagem	42
Tabela 15 - Percentagem temporal em que a motorização OM 906 requer mais potência do que a disponível nas viagens realizadas pela motorização OM 457	44
Tabela 16 - Velocidade média e velocidade operacional de cada viagem	46
Tabela 17 – Equações das linhas de tendência dos critérios seleccionados	53
Tabela 18 - Valores dos consumos reais de combustível em cada viagem	55
Tabela 19 – Consumos previstos de combustível previstos por carreira para cada motorização	56
Tabela 20 - Alocação das viaturas e respectivo consumo	57
Tabela 21 - Redução de emissões da hipótese de alocação 1	57
Tabela 22 - Alocação da OM 906 em Santa Iria e da OM 457 em Caneças	58
Tabela 23 - Alocação da OM 457 em Santa Iria e da OM 906 em Caneças	59
Tabela 24 - Alocação exclusivamente com viaturas OM 906 e respectivo consumo	60
Tabela 25 - Redução de emissões da hipótese de alocação 3	60

Índice de figuras

Figura 1 - Percentagem de utilização dos transportes terrestres na Europa e em Portugal segundo o Eurostat [2]	12
Figura 2 - Exemplo da configuração de duplo pneu (esquerda) com os pneus individuais (direita) [6]	17
Figura 3 - Configuração híbrida em paralelo	18
Figura 4 - Configuração híbrida em série	19
Figura 5 - Consumo médio anual e previsão para 2018	24
Figura 6 - Especificações técnicas das motorizações OM 906 (à esquerda) e OM 457 (à direita) [32], [33]	25
Figura 7 - Distribuição temporal de STP (exemplo da viatura B)	33
Figura 8 - Curva de consumo com correcção ao ralenti (curva da viatura C)	35
Figura 9 - Caracterização do contexto de cada carreira	37
Figura 10 - Curvas de consumo das várias viaturas caracterizadas	41
Figura 11 - Consumo médio de combustível previsto por viatura	43
Figura 12 - Consumo médio de combustível previsto por motorização	43
Figura 13 - Comparação entre o tempo ao ralenti e a velocidade média de cada carreira	47
Figura 14 - Análise temporal em meio urbano de cada carreira	47
Figura 15 - Análise temporal do declive em cada carreira	48
Figura 16 - Média do número máximo de passageiros e respetivo desvio padrão por carreira ..	49
Figura 17 - Linha de tendência entre a velocidade média e o consumo médio de combustível ..	49
Figura 18 - Linha de tendência entre a percentagem de tempo ao <i>ralenti</i> e o consumo de combustível médio	50
Figura 19 - Linha de tendência entre percentagem temporal de utilização em meio urbano e o consumo de combustível médio	51
Figura 20 - Linha de tendência entre percentagem temporal de declive e o consumo de combustível médio	52
Figura 21 - Linha de tendência entre a média máxima de passageiros e o consumo médio de combustível	53
Figura 22 - Consumo médio de combustível previsto por motorização e declive das carreiras ..	54
Figura 23 - Consumo médio de combustível previsto por motorização e velocidade média das carreiras	54

Lista de abreviaturas

ARTEMIS – *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*

CMEM – *Comprehensive Modal Emission Model*

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

COPERT – *Standard Vehicle Emissions Calculator*

GPS – *Global Positioning System*

HBEFA – *Handbook Emission Factor For Road Transport*

ILP – *Integer Linear Programming*

MOVES – *Motor Vehicle Emission Simulator*

NO_x – Óxidos de Azoto

PHEM – *Passenger Car and Heavy Duty Emission Model*

PM – *Particle Matter*

RGCE – Regulamento de Gestão do Consumo de Energia

STP – *Scaled Tractive Power*

TTW – *Tank to Wheel*

VSP – *Vehicle Specific Power*

WTT – *Well to Tank*

WTW – *Well to Wheel*

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Um dos grandes problemas que se vive nos dias de hoje está associado à poluição atmosférica, a qual provém, em grande parte, da combustão dos combustíveis utilizados para gerar energia e, como não podia deixar de ser, grande parte dessa energia é utilizada no sector dos transportes, representando 36.9% do consumo de energia primária em Portugal [1].

A substituição de um veículo movido por um combustível fóssil por um que utilize uma fonte de energia alternativa (p.e., veículo eléctrico ou a pilhas de hidrogénio), muitas das vezes ainda não é viável devido ao alto investimento necessário à aquisição destas viaturas. Outra dificuldade prende-se com o abastecimento, uma vez que os veículos propulsionados por motores de combustão têm a vantagem não só de serem de abastecimento rápido, como de poderem disfrutar de uma grande disponibilidade de infra-estruturas onde abastecer.

No entanto, os veículos com fontes de energia alternativas constituem uma possibilidade plausível, não só para veículos ligeiros, como também para os pesados, entre eles, os de passageiros, que são uma alternativa ao transporte pessoal.

Estes apresentam um consumo energético por passageiro muito inferior ao de um veículo ligeiro. Na Tabela 1, encontram-se os valores de consumo energético médio por passageiro (MJ/pass.km), estimado com base em 84 cidades mundiais [3].

Tabela 1 - Consumo energético por tipo de veículo (MJ/pass.km) [3]

Tipo de veículo	Consumo (MJ/pass.km)
Automóvel	2,45
Autocarro	1,05
Metro	0,46
Comboio Suburbano	0,61
Eléctrico	0,52

A nível de transportes públicos urbanos e suburbanos, e analisando as alternativas existentes na região de Lisboa, podemos optar por: autocarro, comboio, metropolitano, barco, *bike-sharing*¹, *car-sharing*², serviço de transporte por *e-hailing*³, táxi.

Na Tabela 2 apresentam-se algumas vantagens e desvantagens de cada alternativa.

¹ modelo de aluguer de bicicletas em que se aluga pela quantidade de tempo utilizada, geralmente percursos rápidos dentro de cidade.

² modelo de aluguer de automóveis ligeiros em que se aluga pela quantidade de tempo utilizada, geralmente percursos rápidos dentro de cidade.

³ chamada e localização através de plataforma eletrónica

Tabela 2 - Diferenças entre meios de transportes citadinos público

Tipo de transporte	Vantagens	Desvantagens
Autocarro	<ul style="list-style-type: none"> • Rede extensa de transportes • Possibilidade de passe mensal (preço fixo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tráfego rodoviário • Dependente de horários
Comboio/metro	<ul style="list-style-type: none"> • Rapidez de transporte • Elevada capacidade de passageiros • Boa eficiência energética (consumo por passageiro) • Possibilidade de passe mensal (preço fixo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependente das linhas ferroviárias existentes • Dependente de horários
Barco	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos problemas com tráfego • Possibilidade de passe mensal (preço fixo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de completar a deslocação com outro meio de transporte • Dependente das condições meteorológicas • Dependente de horários
Bike-sharing	<ul style="list-style-type: none"> • Barato • Possibilita fazer-se exercício físico • Zero emissões • Não depende de horários 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste físico • Maior perigo de acidentes • Pouco prático para grandes distâncias • Depende da disponibilidade de viaturas • Dependente das condições meteorológicas
Car-sharing	<ul style="list-style-type: none"> • Não depende de horários • Transporte "porta a porta" • Maior comodidade e conforto 	<ul style="list-style-type: none"> • Preços elevados • Tráfego rodoviário • Preocupação com estacionamento • Depende da disponibilidade de viaturas • Necessidade de carta de condução
e-hailing/táxi	<ul style="list-style-type: none"> • Não depende de horários • Transporte "porta a porta" • Maior comodidade e conforto 	<ul style="list-style-type: none"> • Preços elevados • Tráfego rodoviário

No que toca aos veículos pesados de passageiros, estes são responsáveis por menos de 10% do consumo final de energia na área dos transportes [2], a nível europeu, sendo que em Portugal esta percentagem se encontra abaixo da média europeia, devido ao uso elevado do transporte pessoal e privado.

Embora a percentagem da energia consumida por este tipo de veículos possa parecer insignificante, deve ter-se em atenção que, na Europa, mais de 80% do consumo dos transportes terrestres respeita aos veículos ligeiros de passageiros, sendo que em Portugal chega perto dos 90% [2]. Na Figura 1, apresentam-se os dados do Eurostat sobre a percentagem da referida utilização.

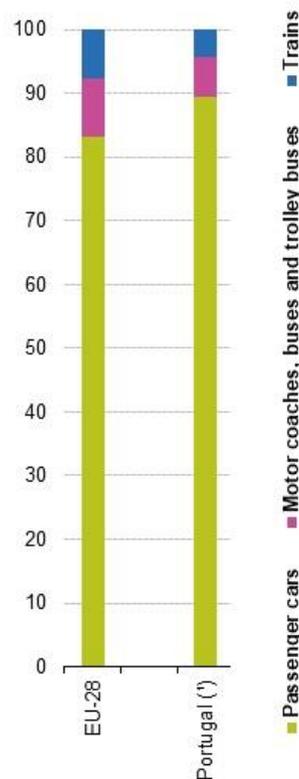


Figura 1 - Percentagem de utilização dos transportes terrestres na Europa e em Portugal segundo o Eurostat [2]

As empresas de transporte de pesados de passageiros, em que a aquisição de novos veículos mais eficientes obriga a avultados investimentos, têm sempre outras alternativas de acordo com os seus recursos. Algumas destas alternativas implicam apenas pequenos investimentos ou custos, ou ainda a simples alterações a nível interno. Programas e cursos de eco condução, programas de alocação de viaturas, monitorização e gestão de tráfego, otimização da frota e a correta manutenção dos veículos são algumas das formas de reduzir o consumo energético. A implementação deste tipo de soluções tem extrema importância a nível ambiental, reduzindo as emissões de gases e diminuindo os custos operacionais das mesmas.

Por outro lado, para conseguirem um menor consumo de combustível, as empresas são incentivadas a adoptarem novas tecnologias para cumprirem os regulamentos de emissões de poluentes, conhecidos por normas EURO, sendo estas cada vez mais exigentes e apertadas.

Ao longo dos anos, foram sendo implementadas várias normas EURO, desde a inicial EURO I, em 1992, até à atualmente em vigor, a EURO VI, datada de 2013; as restrições a nível de emissões de poluentes locais tornaram-se cada vez mais rígidas, como se pode ver na Tabela 3, onde se encontra a comparação entre as sucessivas versões no que respeita aos motores Diesel para pesados.

Tabela 3 - Emissões *standard* para motores Diesel de Pesado - Normas EURO

Norma	Ano	CO	HC	NOx	PM
EURO I (g/kWh)	1992	4,5	1,1	8,0	0.36
EURO II (g/kWh)	1998	4.0	1.1	7.0	0.15
EURO III (g/kWh)	2000	2.1	0.66	5.0	0.10
EURO IV (g/kWh)	2005	1.5	0.46	3.5	0.02
EURO V (g/kWh)	2008	1.5	0.46	2.0	0.02
EURO VI (g/kWh)	2013	1.5	0.13	0.40	0.01

Embora as restrições das normas EURO obriguem a que os veículos novos sejam menos poluentes, nem sempre as empresas têm capacidade financeira para o necessário investimento, tendo até por vezes de optar pela aquisição de viaturas usadas para substituição das de em fim de vida.

1.2. Objectivo

A aplicação de medidas de melhoria de eficiência energética na área dos transportes pesados de passageiros é um tema que pode ser abordado de diferentes pontos de vista, consoante os diferentes níveis de investimento que implicam. Assim sendo, o objectivo principal desta dissertação assenta na implementação de medidas que possibilitem avaliar e reduzir, tanto o consumo de combustível, como as emissões de poluentes, quer ainda os custos operacionais, através de uma alocação mais eficiente dos veículos pelas rotas, avaliando os impactes energéticos associados à mesma, sem que comprometa a operação da frota.

Por forma a atingir o objetivo principal referido anteriormente, foram definidas as seguintes tarefas:

- Monitorização em condições reais de utilização de autocarros em operação regular:
Testes realizados a bordo das viaturas da Rodoviária de Lisboa (RL) em condições reais, utilizando um GPS para a caracterização dinâmica tanto das viaturas como dos percursos, medindo o consumo de combustível (atestando a viatura no início e no fim de cada viagem) e o número de passageiros a bordo entre as diversas paragens.
- Análise de bases de dados existentes sobre consumo, lotação, ocupação, etc.:
Para melhor compreender a realidade vivida pelas empresas de transportes de pesados de passageiros, a realização deste levantamento proporciona um melhor conhecimento dos factos, servindo de ferramenta para a melhor escolha dos autocarros e dos trajectos a ensaiar para as necessidades da empresa; desta forma, o levantamento e análise dos dados já existentes servirão como base para todo o trabalho a desenvolver.

- Desenvolvimento de uma ferramenta/metodologia que permita estabelecer relações entre características dos veículos e dos percursos:

Pretende-se que, com a metodologia utilizada a partir dos dados recolhidos experimentalmente, a ferramenta auxilie a alocação das viaturas; assim sendo, este processo passa por uma análise numérica onde se pretende avaliar o comportamento de cada viatura em diversos percursos.

- Validação da ferramenta e aplicação da mesma para análise dos respectivos impactes energéticos e ambientais:

Será realizada a validação da ferramenta criada, de forma a obter o menor erro possível na caracterização, tanto das viaturas como dos percursos em estudo; após tal validação, será estudada a melhor forma de alocar as viaturas aos percursos, para um menor consumo de combustível perante a atual situação.

A aplicação e utilização desta ferramenta ajudará a estimar os consumos de uma viatura num dado percurso, sem que esta passe obrigatoriamente pelo mesmo. Deste modo e sempre que necessário, poderá recorrer-se à monitorização de uma viatura, de modo a que esta seja caracterizada e, à *posteriori*, prever o seu consumo energético e decidir sobre a respetiva alocação.

Para melhor adaptação das empresas de transportes de passageiros ao respetivo panorama, com o intuito de reduzir os consumos e emissões dos autocarros, realizou-se um estágio na empresa Rodoviária de Lisboa (RL), ao abrigo do projecto Galp21, o qual resulta da parceria entre o Instituto Superior Técnico e a empresa GALP ENERGIA.

Os dados analisados nesta dissertação têm por base os dados e informações recolhidas na Rodoviária de Lisboa.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação encontra-se dividida e organizada em 6 capítulos, alguns destes divididos em subcapítulos.

Começa pela Introdução onde se encontra o enquadramento sobre o tema em estudo, objectivos traçados para a realização do trabalho e organização da dissertação.

O Estado da arte é o capítulo onde são mencionados os estudos já existentes bem como tecnologias já aplicadas na área da redução de consumos e emissões de viaturas pesadas, bem como análise das mesmas e dos seus resultados.

O capítulo seguinte respeita à Metodologia de aquisição e análise de dados, onde é apresentado o caso em estudo e a metodologia que é tida como base para a avaliação dos veículos, bem como o procedimento experimental de recolha de dados e a sua análise tanto para o cálculo de STP como para a estimativa das curvas de consumo.

A Descrição da ferramenta de alocação constitui o passo seguinte, onde são estudados os dados obtidos e criada uma métrica para alocar as viaturas.

No capítulo de Resultados são avaliados e validados os resultados obtidos e, simultaneamente, percebidos os ganhos de consumo e de impacto ambiental.

Por fim, nas Conclusões e trabalho futuro são retiradas as conclusões de todo este estudo, principalmente no que respeita a reduções de consumo e de emissões, com a finalidade da alocação de viaturas passar a ser efetuada consciente e cientificamente e não de uma forma aleatória. É ainda apresentada uma proposta de trabalho a realizar na sequência desta dissertação, de forma a aprofundar o tema e a ser possível a sua aplicação na realidade da empresa.

2. Estado da arte

Atualmente a preocupação relativa ao consumo de energia e aos seus impactes ambientais é cada vez maior [4] e o constante aumento do preço dos combustíveis [5] tem levado, ao longo dos anos, à tomada de várias medidas com objectivo na redução do consumo de combustíveis e emissões poluentes.

No sector dos transportes rodoviários tal tem implicado o desenvolvimento de novos veículos mais eficientes, com consumos mais baixos e, por sua vez, com um impacte ambiental inferior, não colocando em causa o seu desempenho. As melhorias de eficiência energética podem advir de diversos métodos, como, por exemplo, aumentando a eficiência do motor, quer melhorando a eficiência do próprio processo de combustão, quer diminuindo os seus atritos internos, procurando alternativas aos motores de combustão tradicionais [6] ou ainda utilizando ferramentas de auxílio à condução, tornando-a mais eficiente.

Os transportes coletivos de passageiros, através de veículos pesados de passageiros, têm um impacte significativo no consumo energético, representando cerca de 8% do consumo em Portugal [2]. Deste modo, o sector é constantemente desafiado a melhorar o seu desempenho energético, através do Regulamento de Gestão do Consumo de Energia (RGCE) [7].

Assim sendo, são apresentadas diferentes hipóteses com o intuito de minimizar os consumos energéticos e o impacte ambiental no setor.

Para tal, há dois métodos para reduzir o consumo de combustível deste tipo de veículos: diretamente através da tecnologia utilizada, tornando-as mais eficientes [6] ou gerindo a frota de forma mais adequada, quer através da formação comportamental dos condutores (condução mais defensiva e eficiente) [8], quer através da alocação das viaturas de forma mais rentável [9].

Seguidamente serão apresentadas várias hipóteses de melhoria de desempenho:

Resistência ao rolamento

Uma das maneiras de reduzir o consumo de combustível passa por otimizar a resistência ao rolamento causado pelos pneus - a estes é associada cerca de 13% das perdas de energia de uma viatura [6]. Desta forma, surge uma alternativa à convencional tipologia de duplo pneu utilizado em veículos pesados, passando a um só pneu mais largo, mas, mesmo assim, de menor área de contacto do que o duplo pneu, como se pode observar na Figura 2.



Figura 2 - Exemplo da configuração de duplo pneu (esquerda) com os pneus individuais (direita) [6]

Este tipo de configuração só com um pneu permite uma redução na resistência ao rolamento de cerca de 10% [6], sem comprometer a carga suportada.

Manutenção dos pneus e alinhamento da direcção

Ainda relativamente aos pneus, o cuidado de os manter numa pressão correcta, verificando-a com regularidade, é um factor que ajuda a baixar a resistência ao rolamento. Uma redução da pressão em 20% relativamente à ideal, pode representar um aumento de 5 a 8% da resistência ao rolamento, o que pode representar 2 a 3% de um aumento de consumo [6].

No que diz respeito ao alinhamento da direcção, esta evita um desgaste prematuro dos pneus. Perante uma situação de desalinhamento, a resistência ao rolamento será maior e, por sua vez, o consumo será mais elevado.

$$F_R = F_{R_0} + C_\alpha \alpha^2 \quad (\text{eq. 1})$$

onde:

F_R — Força de resistência ao rolamento

F_{R_0} — Força de resistência ao rolamento base do pneu

C_α — Rigidez do pneu

α — Ângulo de escorregamento

Da equação 1 [6], verifica-se que a resistência ao rolamento varia quadraticamente com o ângulo de escorregamento, que é o ângulo entre a direcção para a qual a roda está apontada e a direcção para a qual se desloca. Num autocarro urbano um alinhamento incorrecto da direcção representa entre 1 a 2% de um aumento de consumo [6].

Peso

O recurso a materiais mais leves de forma a reduzir o peso total da viatura também é um dos aspectos que tem impacte nos consumos de combustível, pois não só reduz a força necessária para combater a força ao rolamento, como diminui a massa total a mover e, assim sendo, não é necessária a mesma potência, principalmente nas acelerações e nas subidas mais exigentes. Uma redução de cerca de 450 kg pode representar descidas de consumo na ordem dos 0,1% nas descidas, 0,7 a 1% em plano e 1,2 a 1,5% nas subidas [6].

Utilização de veículos híbridos

Neste caso, a substituição de veículos de combustão por veículos híbridos (utilização de dois sistemas de propulsão diferentes combinados) pode ser uma opção.

Estes veículos podem ser configurados de duas maneiras possíveis, em paralelo ou em série.

Na configuração em paralelo o motor de combustão e o motor eléctrico estão ligados à transmissão, fornecendo, ambos os motores, potência à viatura [10]. Na Figura 3 pode ser observado este tipo de configuração.

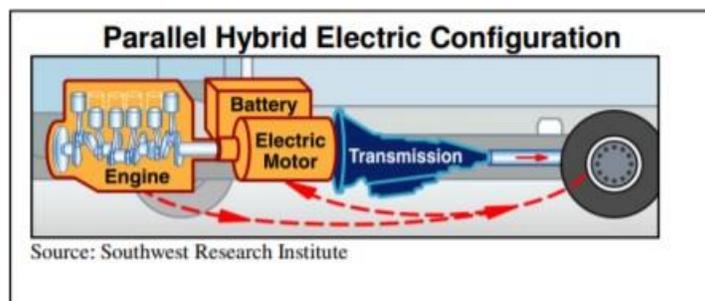


Figura 3 - Configuração híbrida em paralelo

Por outro lado, na configuração em série, a potência é fornecida apenas pelo motor eléctrico, estando o motor a combustão ligado a um gerador de forma a produzir energia eléctrica [10]. Na Figura 4 pode ser observado este tipo de configuração.

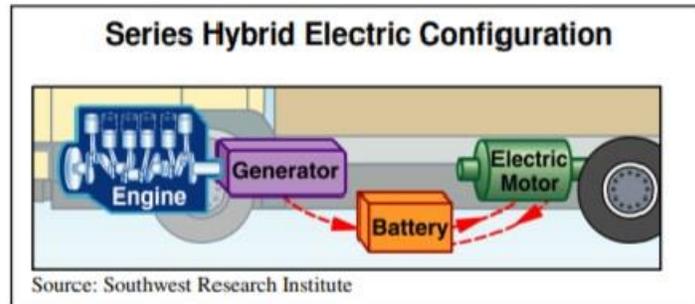


Figura 4 - Configuração híbrida em série

Este tipo de alternativas híbridas, relativamente aos veículos de combustão a gasóleo, pode representar uma diminuição no consumo do combustível fóssil entre os 30 e os 65% [11].

Fontes de energia alternativas

Para além dos motores a combustíveis fósseis, existem outras alternativas para os veículos pesados de passageiros, como, por exemplo: sistemas de propulsão eléctrica, células de hidrogénio ou sistemas a gás natural.

As fontes de energia alternativas têm características diferentes como preço, métodos de extracção, de abastecimento e de conversão da energia em deslocamento. Assim, a comparação entre os diversos combustíveis será feita com base nas emissões de CO₂ dos diferentes autocarros. Na Tabela 4 são apresentados os valores europeus de emissão de CO₂ da extracção dos recursos energéticos até ao gasto para movimentar o veículo, indicador conhecido como *Well-to-Wheel* (WTW). Na Tabela 4 encontram-se também apresentados os valores de consumos intermédios, dividido entre *Well-to-Tank* (WTT), que é desde a extracção à introdução no veículo, e *Tank-to-Wheel* (TTW), que é o consumo verificado na deslocação do veículo. Nos veículos eléctricos e híbridos são utilizados os valores de emissão de CO₂ médios de produção de eletricidade na Europa, que podem provir de diferentes fontes de energia [12].

Tabela 4 - Emissões de CO₂ equivalente por quilómetro dos diversos tipos de autocarros [13]

Tipo Autocarro	Fonte de energia	WTT (gCO ₂ eq./km)	TTW (gCO ₂ eq./km)	WTW (gCO ₂ eq./km)	% de redução média comparativa com o Diesel
Diesel	Gasóleo	218	1004	1222	-
Gás Natural	Gás Natural Comprimido	157	1014	1171	4.17
Híbrido Plug-in (em paralelo)	Gasóleo + electricidade	172	796	968	20.79
Híbrido Plug-in (em série)	Gasóleo + electricidade	188	870	1058	13.42
Célula de combustível de H₂	Proveniente do vapor do gás natural	320	0	320	73.81
Célula de combustível de H₂	Electrólise da água	305	0	305	74.96
Eléctrico	Electricidade	720	0	720	41.08
Eléctrico	Electricidade proveniente de renováveis	20	0	20	98.36

Da análise de emissões de CO₂, *Well-to-Wheel*, tem-se um panorama das emissões de CO₂ produzidas pelos autocarros na sua movimentação. De destacar que, se a electricidade fornecida aos veículos eléctricos fosse 100% proveniente de fontes de energia renovável, a produção de poluentes seria significativamente reduzida comparativamente com qualquer outra alternativa.

Eco condução

Um dos métodos para uma melhor eficiência na condução passa por adotar um estilo de condução mais económico. Para tal, existem ações de formação destinadas aos condutores, de forma a melhorarem o seu desempenho, mostrando a diferença que o tipo de condução pode fazer nos consumos num mesmo trajeto [14].

Como este tipo de estudos depende das características pessoais de cada motorista, as melhorias obtidas com eco condução podem variar muito [15], embora em média possa haver reduções no consumo de combustível de cerca de 10% [16]. Apesar disso, estudos mostram que, com o passar do tempo após a implementação das medidas de eco condução, os resultados tendem a piorar, voltando os consumos de combustível a aumentar devido à dissipação dos comportamentos de condução apreendidos [16].

Tempo ao *ralenti*

O tempo ao *ralenti* pode representar cerca de 20 a 40% do tempo de funcionamento de um motor e, assim sendo, reduzir tal período é uma das formas de reduzir o consumo de combustível [17].

No caso dos autocarros urbanos, que passam parte do seu tempo no trânsito, o tempo ao *ralenti* de cada viagem pode ser elevado. Neste caso, a introdução de sistemas *Stop/Start*, sistema que desliga o motor quando a viatura se encontra parada reactivando-o assim que seja necessário, pode reduzir o consumo entre 3 a 10% [6], [18].

Gestão de frota

Uma boa gestão da frota disponível pode também contribuir para a redução do consumo de combustível. Para tal há vários fatores que podem contribuir.

Um desses fatores é o de haver uma constante monitorização da contagem de passageiros a bordo de cada viatura em cada carreira; deste modo é possível escolher a tipologia do autocarro necessária para cumprir os requisitos de cada percurso; este tipo de decisão pode, segundo dados da Rodoviária de Lisboa, representar reduções de consumo na ordem dos 25%.

Outro fator importante é a programação e planeamento dos horários das carreiras, para que não haja demasiadas viaturas em locais sem correspondência com a procura, mas mantendo as necessidades da população. Neste ponto, também de referir que é importante prever o tempo de cada viagem, de modo a gerir as viaturas e os motoristas.

Para ajudar na gestão da frota existem sistemas de ajuda à exploração e informação de frota, estudando padrões de utilização por condutor, por viatura, por tempo, entre outras [19].

Alocação de viaturas

Uma forma de diminuir os consumos e reduzir as emissões de poluentes atmosféricos pode também passar por uma alocação de frota mais cuidada. Deste modo é possível, através da avaliação dos percursos, das viaturas, do número de passageiros, da condução do motorista, entre outros factores, proceder às suas caracterizações e estudar a forma mais adequada de as alocar de forma a obter melhores consumos de combustível e de emissões de poluentes.

Num estudo realizado na Índia, a alocação de uma frota foi efetuada de forma a otimizá-la por cada centro de operação, com o intuito de reduzir a distância total percorrida. O objetivo foi de reduzir os “quilómetros mortos”, isto é, determinar a distância percorrida caso se alterem os centros onde se encontram alocadas as viaturas. A ferramenta criada para esse estudo foi modelada com base na Programação Linear Inteira (*Integer Linear Programming*, ILP) [20]. Os respetivos resultados apresentam uma redução de 15.3% na distância percorrida [21]. Noutro estudo equivalente, a redução de quilómetros

percorridos chega aos 30% [22]. Conclui-se, assim, que este método de alocação pode ter resultados bastante significativos mas, ainda assim, não foi o tipo de alocação utilizado nesta dissertação.

Para uma melhor alocação também é possível estudar apenas qual a melhor métrica para distribuir as viaturas sem que, para tal, haja uma preocupação em reduzir a distância percorrida na globalidade. Para que a alocação efetuada tenha resultados positivos é necessário que o consumo total da frota diminua e, para tal, é necessário criar uma métrica para estimar o consumo de cada viatura nos diversos percursos e organizar a frota para que o consumo de combustível seja minimizado.

Assim, é necessário caracterizar tanto as viaturas como os percursos a realizar, de forma a criar uma ferramenta que estime os consumos de cada viatura em cada situação.

São de referir os seguintes tipos de modelos para a caracterização das viaturas: baseados na velocidade média, nas situações de tráfego e na dinâmica da viatura.

Dos modelos com base na velocidade média, derivam os consumos de combustível e emissões de poluentes, caso do modelo COPERT [23] e do modelo MOBILE [24].

Dos modelos com base nas situações de tráfego, correspondendo a situações de trânsito específicas, resultam os consumos de combustível e emissões de poluentes, caso do modelo de HBEFA [25] e do modelo ARTEMIS [26].

Os modelos com base nas situações dinâmicas da viatura, permitem obter os consumos de combustível e emissões de poluentes, caso do modelo PHEM [27], do modelo CMEM [28] e do modelo MOVES [29].

Os modelos baseados na dinâmica da viatura podem ter por base dois tipos de dados. O primeiro, através dos dados de velocidade e aceleração a cada segundo, correlaciona a distribuição modal de potência requerida e o consumo de combustível e/ou emissões poluentes, não sendo necessário assim recorrer a dados provenientes da própria viatura, como dados específicos do funcionamento do motor (posição do acelerador, rotação de funcionamento, potência e binário fornecidos, etc.). O segundo, pelo contrário, utiliza os dados respeitantes ao motor, como os mapas de consumo específico, a velocidade engrenada, as perdas internas por atrito do motor, pressão média efectiva, caudal de combustível, entre outros.

Para os modelos que utilizam a dinâmica da viatura, o cálculo da distribuição modal da potência tem como base, não só a dinâmica da viatura, mas também a tipologia da viatura, o seu peso e a topografia do percurso.

No MOVES10a está definido o *Vehicle Specific Power* (VSP) para veículos ligeiros e o *Scaled Tractive Power* (STP), que tem como base o VSP mas adaptado para veículos pesados, tanto de mercadorias, como de passageiros [30]. Utilizando os dados referentes à dinâmica do veículo é possível calcular os

valores de STP (ou VSP) e tendo este valor de potência instantâneo é facilmente relacionável com o consumo de combustível instantâneo [31]. Este método tem como principal vantagem a utilização de dados provenientes de recolhas exteriores à viatura, não sendo necessário, nem a introdução de sensores, nem de ligações internas.

Devido à falta de informação disponível relativamente à caracterização dos consumos de modelos específicos de veículos pesados de passageiros e das suas rotas tradicionais, são apresentadas metodologias numéricas para um melhor conhecimento da frota de uma empresa e das suas rotas, criando assim um método para avaliar o consumo de combustível e prestações de cada viatura nas diversas rotas possíveis, servindo para otimizar a alocação das viaturas nos diversos trajetos.

Esta metodologia tem por base ensaios efectuados nas condições de utilização reais.

3. Metodologia de aquisição e análise de dados

3.1. Caso de estudo

Para o desenvolvimento desta dissertação, foi realizado um estudo na Rodoviária de Lisboa (RL), que opera na região suburbana da capital. A empresa encontra-se sediada no Campo Grande e opera a partir de três centros, nomeadamente, os de Santa Iria, de Caneças e de Bucelas.

A Rodoviária de Lisboa conta com 375 viaturas, transportando cerca de 200.000 passageiros diariamente. Em 2017, o consumo de combustível foi de aproximadamente 7.8 milhões de litros, tendo sido percorridos cerca de 17 milhões de quilómetros.

Nos últimos anos, o consumo médio anual da empresa tem vindo a aumentar, conforme apresentado na Figura 5. Este aumento deve-se, em grande parte, à aquisição de novas viaturas, maioritariamente Mercedes-Benz Citaro, de 2003-2005, que têm substituído as antigas Mercedes-Benz O405, de 1989-1994. Embora mais recente, o modelo Citaro apresenta consumos mais elevados, pelo facto de estas já terem outro tipo de condições, tanto de segurança (p.e., sistema de extinção de fogo), como de conforto (p.e., ar condicionado), bem como motores mais potentes para cumprirem os vários requisitos necessários.

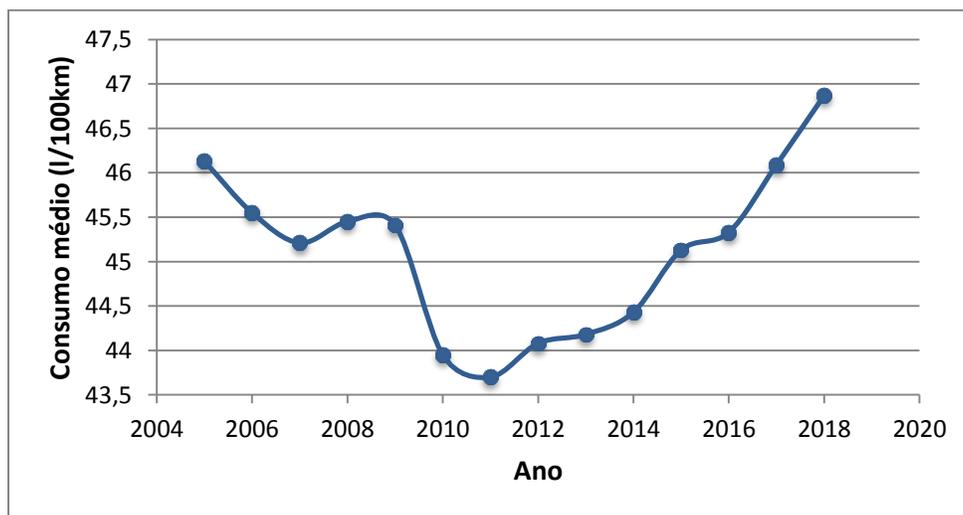


Figura 5 - Consumo médio anual e previsão para 2018

Um dos problemas encontrados na RL está relacionado com a alocação de viaturas, que se encontra longe da respetiva otimização. Apenas são tidas em conta as necessidades relativas à tipologia das viaturas de cada centro, não sendo previamente analisado o comportamento das mesmas, nem efetuada a escolha do respetivo destino em função de todas as restantes variáveis, ou seja, desconhece-se se a alocação de cada viatura está a ser efectuada da melhor forma a nível energético e, consequentemente, a nível económico.

Não sendo possível estudar, na presente dissertação, todos os modelos da frota da empresa e dado que as viaturas Mercedes-Benz Citaro representam cerca de 50% da frota, tomou-se a decisão de se estudar exclusivamente o comportamento das duas motorizações que equipam este modelo, encontrando-se definidas, na Tabela 5, as diferentes características das viaturas testadas.

Tabela 5 - Viaturas Mercedes-Benz Citaro testadas [32], [33]

Nº viatura	Centro	Motor	Cilindrada (c.c.)	Potência (kW)	Ano
A	Caneças	OM457	11967	260	2003
B	Santa Iria	OM457	11967	260	2004
C	Caneças	OM906	6370	210	2004
D	Santa Iria	OM906	6370	210	2005

Na Figura 6, estão representados os gráficos de potência (kW), binário (Nm) e consumo específico (g/kWh), por rotação, tanto para a motorização OM 906, como para a OM 457.

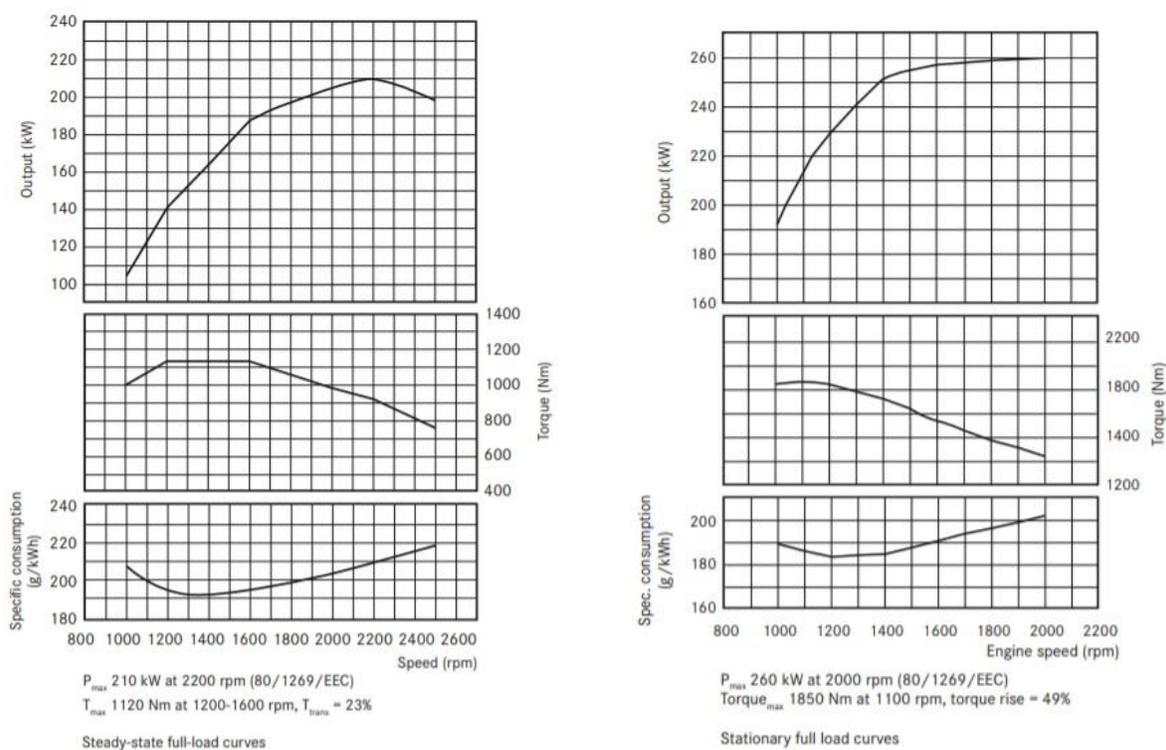


Figura 6 - Especificações técnicas das motorizações OM 906 (à esquerda) e OM 457 (à direita) [32], [33]

Os testes foram efectuados nos centros de Santa Iria e de Caneças, uma vez que o de Bucelas é de menor dimensão e, portanto, com uma representação menos significativa. Para caracterizar as viaturas

nos dois centros, foi necessário testá-las em ambiente real para posteriormente se criar a ferramenta que permite analisar os seus comportamentos.

Todo o processo de testes foi planeado de forma a recolher as seguintes variáveis: consumo de combustível, dados geográficos da viagem, velocidade e aceleração instantânea e número de passageiros a bordo.

Embora alguns dados pudessem ser recolhidos diretamente das viaturas, como velocidade instantânea, velocidade engrenada e rotação do motor, a recolha destes elementos implicaria a autorização específica do fabricante.

Optou-se então por fazer o registo de dados por via externa, recorrendo-se à utilização de um GPS com altímetro barométrico, por ter maior precisão do que um GPS normal, para a recolha de dados das viagens. A contagem dos passageiros foi efetuada a bordo, contabilizando as pessoas que entravam e saíam em cada paragem, embora tivesse sido possível obter posteriormente através dos registos informáticos da própria RL. O consumo de combustível, por sua vez, foi calculado atestando a viatura no início e no final de cada viagem.

Todos os testes foram realizados em período escolar de forma a serem considerados representativos, dada a exiguidade de afluência e de tráfego fora dessa época. Os ensaios realizaram-se em Santa Iria entre 7 e 22 de Maio e em Caneças entre 29 de Maio e 13 de Junho, p^{os} p^{os}.

Na Tabela 6 encontram-se alguns dos dados referentes a cada viagem.

Tabela 6 – resumo das viagens de ensaio efectuadas

Viatura	Viagem	Carreira	Código Viagem	Distância (km)	Tempo (h)	Consumo (l)
A	1	5	5.1	58	3:35	34.6
	2	2	2.1	55	2:29	24.6
	3	4	4.1	88	4:34	44.2
	4	3	3.1	76	4:31	32.7
	5	1	1.1	81	4:43	39.9
Total Viatura A				358	19:51	176.0
B	6	8	8.1	79	3:49	35.6
	7	7	7.1	71	3:53	36.8
	8	8	8.2	79	4:07	39.6
	9	8	8.3	80	4:05	41.3
	10	7	7.2	71	3:35	37.0
Total Viatura B				380	19:29	190.3
C	11	2	2.2	54	2:41	24.6
	12	5	5.2	58	3:20	28.4
	13	4	4.2	89	4:32	41.5
	14	3	3.2	76	4:45	32.7
	15	1	1.2	82	4:43	36.9
Total Viatura C				359	20:01	164.2
D	16	6	6.1	80	4:48	29.8
	17	6	6.2	44	2:42	21.2
	18	6	6.3	81	3:35	31.1
	19	6	6.4	81	3:25	35.1
	20	6	6.5	81	3:29	27.3
Total Viatura D				367	17:00	144.5

A cada uma das 20 viagens realizadas foi atribuído um código de viagem, sendo este código composto pelo número da carreira onde foi realizada (1-8) e pelo número de ordem da utilização dessa mesma carreira (p.e "3.2" corresponde à segunda viagem efetuada na carreira 3).

3.2. Metodologia de recolha e de análise de dados

Optou-se por recorrer à metodologia STP (do inglês, *Scaled Tractive Power*) para fazer a caracterização das viaturas em ensaio, sendo apenas necessários elementos relativos à topografia, à dinâmica e ao peso do veículo.

Esta metodologia foi desenvolvida pelo governo americano para analisar a distribuição de potências ao longo de cada viagem para, *a posteriori*, estimar os consumos e emissões poluentes de veículos pesados, tanto dos de mercadorias como de passageiros [30].

O método advém da metodologia VSP (*Vehicle Scaled Power*) utilizado para veículos ligeiros, a qual avalia a potência instantânea através da dinâmica de cada viagem, mas, dadas as diferentes características dos pesados de passageiros, o método VSP não é compatível, recorrendo-se ao método STP.

3.2.1.Procedimento experimental para a recolha de dados

Para a caracterização de cada veículo foi necessário monitorizar as variáveis apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis necessárias para a caracterizar as viaturas

Variável	Modo de aquisição	Método de cálculo	Frequência de aquisição
Velocidade	GPS com altímetro barométrico (Garmin GPSTMap 64st)	Variação de posição a cada segundo	1 Hz
Aceleração		Variação de velocidade a cada segundo	
Declive		Quociente entre a variação de posição e a variação de altitude	
Peso viatura	Características da viatura (livrete)	-	-
Peso passageiros	Contagem feita a bordo ao longo da viagem	Variação entre os passageiros que entram e saem a cada paragem	A cada paragem
Consumo total combustível	Atesto de combustível no veículo	Leitura dos litros de combustível atestado no fim da viagem	Início e fim da viagem
Consumo ao <i>ralenti</i>	Atesto de combustível no veículo	Leitura dos litros de combustível atestado no fim do teste	Início e fim do teste

Os dados provenientes do GPS, coordenadas geográficas e altitude, foram registados segundo a segundo, servindo de base para o cálculo da velocidade, da aceleração e do declive. A velocidade foi calculada através da variação da latitude e da longitude. De forma similar, conhecendo-se a velocidade a cada segundo, calculou-se a aceleração. O declive foi calculado tendo em consideração a variação da altitude e a variação das restantes coordenadas.

Iniciaram-se os registos no GPS em simultâneo com a ignição do veículo, após o seu abastecimento, e terminaram-se aquando da paragem do mesmo na central, antes do reabastecimento. Em situações em que a viatura foi desligada durante o percurso (normalmente por se encontrar num local de transição de carreira), contabilizou-se esse período de tempo para posteriormente ser deduzido na viagem.

O peso total decompõe-se numa parte fixa e outra variável. A fixa diz respeito ao peso bruto do veículo, proveniente das características do mesmo, não tendo sido logisticamente possível pesar cada veículo numa balança para pesados. O peso variável respeita aos passageiros transportados, tendo sido contados os que entraram e que saíram em cada paragem e utilizado um peso de 69 kg/pass, valor referente ao peso médio da população portuguesa [34].

O consumo total por viagem foi calculado atestando a viatura no início e no final de cada viagem, tendo havido o cuidado de atestar sempre na mesma bomba de abastecimento em cada um dos centros, tanto por razões de inclinação do piso, como por razões de aferição das bombas. Os abastecimentos eram efectuados até à boca do depósito e não ao disparo da pistola de abastecimento, seguindo-se o seguinte procedimento:

1. O veículo é abastecido até ao momento em que a pistola dispara e para de abastecer;
2. A pistola é retirada e acercada do bocal, continuando-se a abastecer o depósito até ao seu limite;
3. Deixam-se passar alguns segundos até o combustível parar de borbulhar e o respetivo nível descer, sinal de existência de ar dentro do depósito;
4. Continua-se o abastecimento do depósito até que o combustível se encontre ao nível do bocal, sem a criação de bolhas, repetindo o ponto 3 a quantidade de vezes necessária.

É muito importante que o abastecimento seja feito em condições uniformes para uma maior precisão do mesmo, razão por que se optou pelo procedimento descrito.

Relativamente aos testes de consumo ao *ralenti*, procede-se de forma idêntica aos abastecimentos efectuados antes e após as viagens. Após atestar o depósito da viatura, a mesma é ligada e deixada a trabalhar, sem se movimentar, durante trinta minutos, ao fim dos quais é desligada e reabastecida, seguindo o procedimento de abastecimento. Foram efetuadas duas aferições ao *ralenti* por viatura, um com o ar condicionado ligado e outro com o mesmo desligado. Verificou-se que o consumo ao *ralenti* era igual para ambas as motorizações em teste.

Um dos problemas com a recolha de dados proveniente do GPS resulta dos erros do mesmo, tanto por questões de ruído em séries temporais, que produz efeitos de incerteza, como de alterações de pressão na atmosfera:

- o altímetro barométrico, para melhor precisão da altitude, relativamente a um GPS convencional, utiliza a pressão para o cálculo da mesma; como o sensor foi colocado no interior da viatura, cada vez que eram abertas e fechadas as portas, para entrada e saída de passageiros, tal podia fazer oscilar os valores da altitude registados;
- ao registarem-se os dados com uma frequência discreta, 1 Hz, podemos estar a subestimar o percurso e a distância percorrida, uma vez que, ao calcular-se a distância entre os diversos pontos, estes são percorridos como se de uma linha reta se tratasse, algo que nem sempre se verifica;
- o registo efectuado quando o veículo está parado nem sempre é certo, havendo situações em que o veículo está parado mas o GPS regista pequenas oscilações na posição, calculando velocidades diferentes de zero; assumiu-se que todas as velocidades entre $[-1, 1]$ m/s seriam igualadas a zero.

Os ensaios realizados às diferentes viaturas seguiram todos os mesmos critérios e procedimentos, tendo-se realizado cinco ensaios a cada viatura. Na Tabela 8, são apresentados alguns dados importantes relativamente a cada viagem de cada uma das viaturas.

Tabela 8 - Viagens realizadas com cada viatura

Veículo	Centro	Código viagem	Carreira	Tempo total de viagem (s)	Tempo ao ralenti (%)	Consumo (l/100km)	Número máximo de pass	Avaliação da circulação
A	Caneças	5.1	5	12893	38.1	59.0	38	Urbano
		2.1	2	8916	30.5	44.6	37	Suburbano
		4.1	4	16421	32.5	50.0	37	Suburbano
		3.1	3	16285	42.0	43.1	47	Suburbano
		1.1	1	16952	37.5	48.7	50	Urbano
B	Santa Iria	8.1	8	13756	30.4	44.9	82	Suburbano
		7.1	7	13995	51.8	51.8	61	Urbano
		8.2	8	14803	33.7	49.9	76	Suburbano
		8.3	8	14683	34.5	51.8	73	Suburbano
		7.2	7	12883	37.3	52.1	56	Urbano
C	Caneças	2.2	2	9688	33.1	45.3	56	Suburbano
		5.2	5	11987	37.4	49.3	44	Urbano
		4.2	4	16298	31.1	46.6	42	Suburbano
		3.2	3	17107	37.9	43.0	46	Suburbano
		1.2	1	16948	41.2	45.0	51	Urbano
D	Santa Iria	6.1	6	13695	32.5	37.1	44	Urbano
		6.2	6	9712	41.8	48.6	58	Urbano
		6.3	6	12924	31.0	38.7	47	Urbano
		6.4	6	12273	34.6	43.4	44	Urbano
		6.5	6	12579	30.1	33.8	50	Urbano

3.2.2. Metodologia de análise de dados

A metodologia STP utilizada para a caracterização e análise dos dados recolhidos rege-se pela equação.

$$STP_t = \frac{Av_t + Bv_t^2 + Cv_t^3 + m_tv_t(a_t + g \sin \theta)}{f_{esc}} \quad (\text{eq. 2})$$

onde:

STP_t - Scaled Tractive Power (Potência de Tração Escalada) no instante de tempo t, em kW (escalados);

v_t - Velocidade no instante de tempo t, em m/s;

a_t - Aceleração no instante de tempo t, em m/s²;

m_t - massa da viatura (fixa) + massa dos passageiros no instante t, em toneladas;

f_{esc} - fator de escala, de valor fixo igual a 17.1;

$\sin \theta$ - declive, fração entre a altitude e a variação de coordenadas;

g - aceleração gravítica, de valor fixo igual a 9.81 m/s²;

A - fator de resistência ao rolamento, em kW.s/m;

B - fator de resistência à rotação, em kW.s²/m²;

C - fator de resistência aerodinâmica, em kW.s³/m³.

Os valores de A, B e C foram retirados do estudo efectuado por V. A. Petrushov, tanto para veículos pesados como para autocarros, como é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores das constantes para a cálculo de STP

	Pesados de mercadorias, [3,855; 6,350] tons	Pesados de mercadorias, [6,350; 14,968] tons	Pesados de mercadorias, >14,968 tons	Autocarros e autocarvanas
$\frac{A [kW.s/m]}{M [ton]}$	0.0996	0.0875	0.0661	0.0643
$\frac{B [kW.s^2/m^2]}{M [ton]}$	0	0	0	0
$\frac{C [kW.s^3/m^3]}{M [ton]}$	$\frac{1.47}{massa (kg)}$ $+ 5,22 \times 10^{-5}$	$\frac{1.93}{massa (kg)}$ $+ 5,90 \times 10^{-5}$	$\frac{2.89}{massa (kg)}$ $+ 4,21 \times 10^{-5}$	$\frac{3.22}{massa (kg)}$ $+ 5,06 \times 10^{-5}$

Todas as potências instantâneas calculadas pelo STP_t foram distribuídas de forma modal. Para tal, agruparam-se as várias potências de acordo com o seu valor truncado (p. e, se o valor estiver no intervalo [5, 6[, este passa a pertencer ao grupo de valor 5).

O STP pode apresentar valores negativos, positivos ou nulo. Sendo que, quando o STP é nulo (igual a zero), significa que o veículo se encontra parado e, por isso, ao *ralenti*. Quando os valores são positivos,

geralmente indicam situações de carga, geralmente acelerações e situações de velocidade constante. Quando os valores são negativos, este geralmente indicam situações de desaceleração.

3.3. Metodologia para estimar curvas de consumo

Através da distribuição de potência efetuada de forma modal foi possível verificar que o tempo ao *ralenti* de cada viagem foi cerca de 30 a 50%, tendo esta uma grande influência posteriormente no cálculo do consumo realizado. A Figura 7 representa um exemplo da distribuição modal temporal de STP de uma viagem de uma das viaturas.

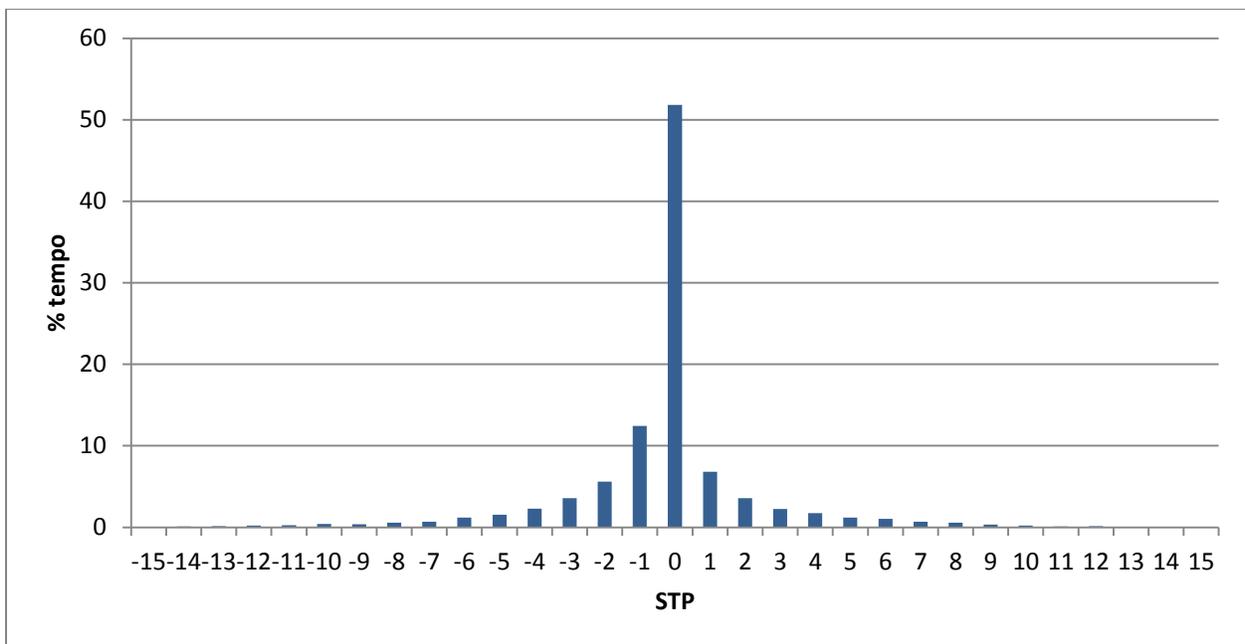


Figura 7 - Distribuição temporal de STP (exemplo da viatura B)

Após obter a distribuição STP de todas as viagens, estas foram utilizadas, juntamente com o consumo de cada viagem, para estimar a curva de consumo característica de cada veículo.

Tendo em conta as curvas de consumo utilizadas para veículos ligeiros, assumiu-se que para autocarros a curva de consumo seria idêntica, apresentando 3 fases diferentes:

- Para potências bastante negativas, para $STP < -10$, o valor de consumo é constante;
- Para potências compreendidas entre $[-10, +10]$, o valor do consumo varia de acordo com uma equação de segundo grau em função do valor de STP;
- Para potências positivas elevadas, $STP > +10$, o valor do consumo varia de forma linear em função do valor de STP.

Os valores dos pontos -10 e +10, utilizados para a fronteira entre as diferentes fases, foram escolhidos por serem os que apresentavam menor erro, tendo sido achados por processo iterativo, utilizando vários valores de continuidade.

Deste modo, as três fases da curva de consumo são:

$$cons. [l/s] = \begin{cases} a, & STP < -10 \\ bSTP^2 + cSTP + d, & -10 < STP < +10 \\ eSTP + f, & STP > +10 \end{cases} \quad (eq. 3)$$

Para determinar as constantes a , b , c , d , e e f , teve de se recorrer a um sistema de equações de 6 equações, sendo que quatro destas equações vêm da continuidade nos pontos -10 e +10, achando a continuidade na curva de consumo e na sua derivada.

Assim, foi necessário encontrar a derivada da curva de consumo, tendo:

$$\frac{d(cons. [l/s])}{d STP} = \begin{cases} 0, & STP < -10 \\ 2bSTP + c, & -10 < STP < +10 \\ e, & STP > +10 \end{cases} \quad (eq. 4)$$

A partir das equações, estabelecendo as condições de continuidade, obtém-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} cons. = \begin{cases} a = b(-10)^2 + c(-10) + d, & STP = -10 \\ b(+10)^2 + c(+10) + d = (+10)e + f, & STP = +10 \end{cases} \\ \frac{d cons.}{d STP} = \begin{cases} 0 = 2b(-10) + b(-10) + c, & STP = -10 \\ 2b(+10) + c = e, & STP = +10 \end{cases} \end{array} \right. \quad (eq. 5)$$

As duas equações em falta vêm da equação do consumo total referentes a duas das viagens da viatura. A equação do consumo total ($cons_{total}$) é calculada através do somatório do consumo para cada grupo de STP ($cons_i$), multiplicado pelo tempo de utilização em cada grupo (t_i):

$$cons_{total} [l] = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} cons_i [l/s] \times t_i [s] \quad (eq. 6)$$

Ficando por fim, com o sistema de 6 equações definido para obter os valores das constantes a , b , c , d , e e f .

$$\left\{ \begin{array}{l} cons_{.1} = \sum_{i=-\infty}^{-11} a \times t_{STP} + \sum_{i=-10}^{-1} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \delta \times t_{STP=0} + \sum_{i=+1}^{+10} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \sum_{l=+11}^{+\infty} (eSTP + f)t_{STP} \\ cons_{.2} = \sum_{i=-\infty}^{-11} a \times t_{STP} + \sum_{i=-10}^{-1} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \delta \times t_{STP=0} + \sum_{i=+1}^{+10} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \sum_{l=+11}^{+\infty} (eSTP + f)t_{STP} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} a &= b(-20)^2 + c(-20) + d \\ b(+20)^2 + c(+20) + d &= (+20)e + f \\ 0 &= 2b(-20) + b(-20) + c \\ 2b(+20) + c &= e \end{aligned}$$

(eq.7)

δ é o elemento relativo ao consumo ao ralenti, tendo sido utilizado o valor apurado de $8,89 \times 10^{-4} l/s$, proveniente dos testes efectuados com ar condicionado ligado, pois os ensaios realizaram-se entre Maio e Junho, tendo andado a maioria do seu tempo com este ligado. Foram realizados ensaios tanto com o ar condicionado ligado, como com o ar condicionado desligado para ambas as motorizações em teste, embora já pré definido que se fosse utilizar o consumo ao ralenti com ar condicionado ligado, aproveitou-se para estudar qual o seu impacte real. Os resultados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados dos testes ao ralenti

Motorização	Ar Condicionado	Consumo (l/h)
OM 906	Não	3.1
	Sim	3.2
OM 457	Não	3.1
	Sim	3.2

O consumo ao ralenti, STP=0, não se rege pela equação de segundo grau, pois quando a viatura se encontra ao ralenti, o consumo baixa visto que a carga a que está sujeito o motor é mais baixa do que estando a viatura em movimento, independentemente de se estar perante valores de potência positivos ou negativos. Na Figura 8 encontra-se o exemplo de uma curva de consumo de uma das viaturas testadas.

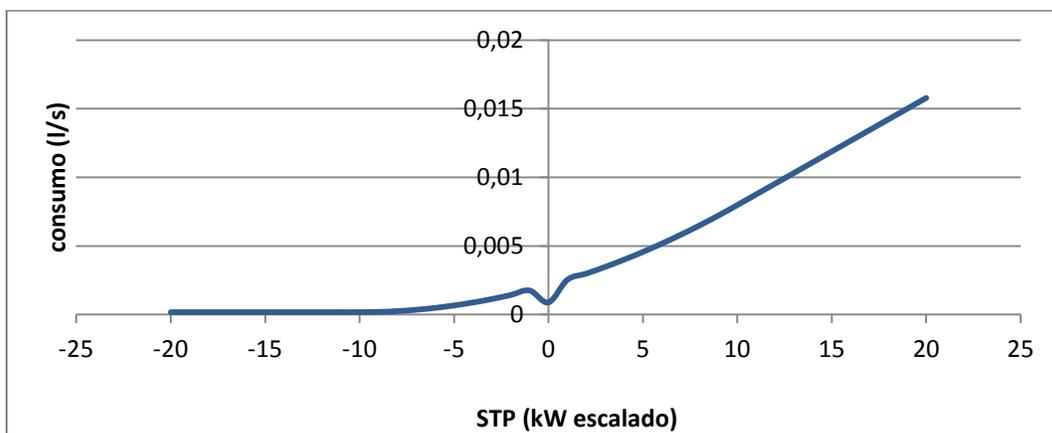


Figura 8 - Curva de consumo com correcção ao ralenti (curva da viatura C)

4. Descrição de ferramenta de alocação

Com os dados recolhidos para o cálculo da distribuição de STP de cada viagem e através da curva de consumo de cada veículo, foi desenvolvida uma ferramenta que pretende simular qual o consumo de cada viatura nas diferentes viagens, sem que tal viatura precise de passar por tal percurso. Assim sendo, aproveitando as distribuições de STP de cada percurso é possível simular qual o consumo teórico de cada viatura nesse mesmo percurso, com base nas equações apresentadas no capítulo 3.

Uma vez que as duas motorizações utilizadas para testes têm potências diferentes, foi necessário verificar, em primeiro lugar, se a motorização menos potente (motorização OM 906, com 210kW) seria suficiente para cumprir os requisitos da motorização mais potente (motorização OM 457, com 260kW).

Para analisar se a potência requerida seria suficiente para acompanhar a dinâmica original, foi utilizada a equação nº 8, que resulta do balanço de forças que atuam na viatura.

$$P = \left(mg\lambda + C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A_f + m(a + g \sin \theta) \right) v \quad (\text{eq. 8})$$

onde:

P - potência utilizada pelo veículo a cada instante (W);

m - massa total do veículo mais a massa do número total de passageiros (kg);

g - aceleração gravítica, de valor fixo igual a 9.81 m/s²;

λ - resistência ao rolamento, de valor fixo assumido de 0.01 [35];

v - velocidade a cada instante (m/s);

C_D - coeficiente de arrasto aerodinâmico, de valor fixo assumido de 0.6 [36];

ρ - densidade do ar, de valor fixo igual a 1.25 kg/m³;

A_f - área frontal do veículo, de valor fixo igual 8 m²;

a - aceleração a cada instante (m/s²);

$\sin \theta$ - declive a cada instante.

Desta forma, foi possível verificar se as viaturas com o motor OM 906 teriam capacidade para os trajetos originalmente realizados pelas viaturas com o motor OM 457, avaliando-se qual a percentagem de tempo na qual teria de estar a funcionar acima das suas capacidades de potência.

Para melhor alocar as famílias de viaturas testadas, começou-se por separar as diferentes carreiras, para perceber as suas características. Assim sendo, foram analisados os dados recolhidos por GPS, verificando quais as carreiras que teriam comportamentos mais parecidos de forma a agrupá-las.

Para fazer uma distinção das diferentes carreiras, definindo um contexto de utilização, optou-se por analisá-las de acordo com a topografia e contexto. Desta forma, fez-se a separação entre o que seria meio urbano e suburbano, bem como se estaríamos perante uma zona plana ou com inclinações positivas ou negativas.

As carreiras foram avaliadas através dos percursos efetuados nas mesmas, contabilizando apenas uma ida/volta para esta caracterização, começando na paragem de partida inicial e terminando na paragem de chegada final, e não toda a viagem efetuada pelo autocarro. Esta caracterização foi efetuada de forma temporal, por simplicidade da análise dos dados já recolhidos. Para menor influência do tráfego, esta análise foi sempre feita em percursos efetuados em horários de menor volume de trânsito.

Para diferenciar as zonas urbanas das suburbanas, considerou-se como zonas urbanas as mais movimentadas, normalmente com semáforos; e zonas suburbanas como as de menor tráfego.

Para determinar a topografia considerou-se que sempre que o declive estivesse entre os valores de -4% a +4%, esta seria considerada uma zona plana; quando o declive fosse inferior a -4% estar-se-ia perante uma zona de inclinação negativa (declinada) e quando superior a +4% perante uma zona de inclinação positiva (inclinada).

Na Figura 9, estão avaliadas as diferentes carreiras, de acordo com o seu contexto, tendo sido esta feita de forma percentual de acordo com a viagem de ida/volta.

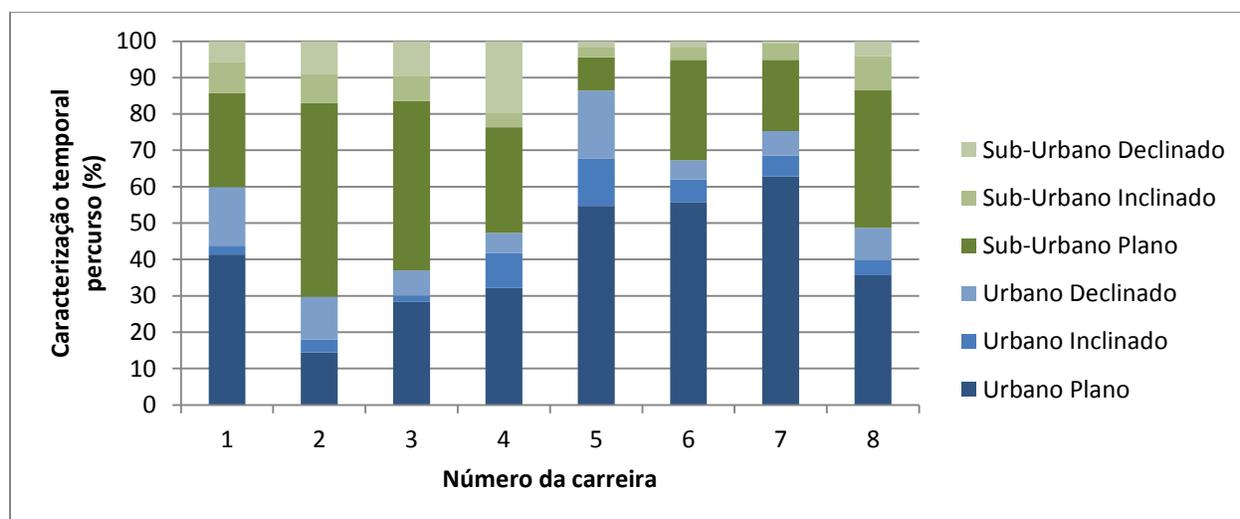


Figura 9 - Caracterização do contexto de cada carreira

Embora haja carreiras que aparentemente apresentem caracterizações semelhantes, tal não indica que as viaturas se comportem de maneiras semelhantes nessas carreiras.

De forma a melhor perceber qual o consumo de cada autocarro em cada carreira optou-se por agrupar as respetivas viagens realizadas pelas respetivas carreiras, de maneira a obter um consumo médio por carreira, e respetivo desvio, para cada autocarro.

Para a devida alocação, teve-se como critério a realidade da empresa, por esta possuir viaturas com ambas as motorizações e por ter mais carreiras do que as testadas nesta dissertação.

Conhecidos os consumos, quantificou-se o impacte ambiental recorrendo-se aos fatores de emissão de CO₂, CO, NO_x e PM, pois são os principais poluentes resultantes da queima de combustíveis, neste caso do gasóleo.

Os valores médios das respetivas emissões por cada kg de gasóleo encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores médios de emissão de poluentes [37]

Poluente	g/kg_{gasóleo} mínimo	g/kg_{gasóleo} médio	g/kg_{gasóleo} máximo
CO₂	-	3.14×10 ³	-
CO	5.73	7.58	10.57
NO_x	28.34	33.37	38.29
PM	0.61	0.94	0.04

5. Resultados

Os resultados obtidos na metodologia anteriormente descrita são apresentados e discutidos neste capítulo, avaliando os impactes energéticos e ambientais da proposta de alocação de viaturas às diversas carreiras testadas.

5.1. Validação da ferramenta e resultados da caracterização

As cinco viagens efectuadas em cada viatura foram agrupadas em todas as combinações de pares de viagens possíveis, de forma a estimar todas as hipóteses de curvas de consumo para caracterização da viatura. As curvas de consumo obtidas serviram para estimar o consumo das outras três viagens realizadas com a viatura, mas que não foram utilizadas para obter essas mesmas curvas. Essas três viagens serviram não só para calcular o consumo previsto, como também para validar a ferramenta de forma a utilizar a curva de consumo que melhor se aproxima da realidade, ou seja, para verificar qual teria o menor erro.

As combinações possíveis para cada viatura encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Viagens realizadas com as diferentes viaturas, a verde encontram-se os valores dos erros do par de viagens escolhido para a caracterização de cada viatura

Viagem número	Código viagem	Pares de viagens utilizados para caracterizar as viaturas (% erro entre consumo real e consumo estimado)									
		1 e 2	1 e 3	1 e 4	1 e 5	2 e 3	2 e 4	2 e 5	3 e 4	3 e 5	4 e 5
Viagens realizadas pela viatura A											
1	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.7	-3.6	-4.4	1.4	-3.5	-43.6
2	2.1	0.0	3.9	3.6	4.6	0.0	0.0	0.0	5.0	1.0	-40.8
3	4.1	-16.1	0.0	-1.1	3.1	0.0	-3.8	-0.8	0.0	0.0	-35.0
4	3.1	-61.1	4.3	0.0	16.7	19.0	0.0	15.0	0.0	15.3	0.0
5	1.1	-103	-16.4	-22.1	0.0	5.5	-20.3	0.0	-22.8	0.0	0.0
Erro médio		-36.1	-1.7	-3.9	4.9	4.0	-5.5	1.9	-3.3	2.6	-23.9
Desvio padrão		45.1	8.5	10.3	6.9	9.2	8.5	7.5	11.1	7.3	22.0
Viagens realizadas pela viatura B											
1	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-4.1	17.7	19.7	10.1	18.6	19.9
2	7.1	0.0	-6.2	-50.5	-630	0.0	0.0	0.0	-21.7	-34.8	6.3
3	8.2	2.6	0.0	-18.4	-260	0.0	13.9	15.2	0.0	0.0	17.9
4	8.3	-20.1	-17.7	0.0	231.3	-24.8	0.0	2.3	0.0	14.9	0.0
5	7.2	-16.3	-16.2	-15.0	0.0	-19.7	-1.7	0.0	-7.4	0.0	0.0
Erro médio		-6.8	-8.0	-16.8	-132	-9.7	6.0	7.4	-3.8	-0.2	8.8
Desvio padrão		10.6	8.5	20.6	328.3	11.7	9.1	9.3	11.8	21.1	9.6
Viagens realizadas pela viatura C											
1	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.1	6.8	-14.5	-5.7	-4.8	-3.6
2	5.2	0.0	4.8	-4.5	-9.3	0.0	0.0	0.0	-8.4	-6.2	-7.0
3	4.2	3.8	0.0	7.4	11.1	0.0	16.1	-22.6	0.0	0.0	2.7
4	3.2	16.8	34.6	0.0	-17.7	22.0	0.0	53.0	0.0	5.6	0.0
5	1.2	5.8	8.8	3.0	0.0	5.0	8.5	0.0	-1.7	0.0	0.0
Erro médio		5.3	9.6	1.2	-3.2	5.0	6.3	3.2	-3.2	-1.1	-1.6
Desvio padrão		6.9	1.2	4.4	10.9	9.9	6.7	29.5	3.7	4.7	3.8
Viagens realizadas pela viatura D											
1	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	9.2	-110	-7.5	8.8	10.0	-14.3
2	6.2	0.0	405.7	16.3	-15.6	0.0	0.0	0.0	17.6	-36.4	14.2
3	6.3	-8.3	0.0	-8.0	-8.6	0.0	-108	-15.1	0.0	0.0	-21.0
4	6.4	-16.8	402.5	0.00	-33.0	-18.3	0.0	-15.7	0.0	-56.1	0.0
5	6.5	5.5	148.8	11.3	0.0	12.3	-75.2	0.0	18.2	0.0	0.0
Erro médio		-3.9	191.4	3.93	-11.5	0.6	-58.4	-7.7	8.9	-16.5	-4.2
Desvio padrão		8.8	203.44	9.74	13.7	11.9	55.0	7.7	9.0	28.3	13.7

Algumas das curvas de consumo estimadas, apresentaram valores fisicamente impossíveis, pois em certas partes do gráfico os consumos estimados eram negativos, ou seja, haveria regeneração de energia, algo que cai fora da realidade deste tipo de autocarros. Mesmo nesses casos, optou-se por calcular os erros médios, embora essas curvas de consumo estivessem logo à partida excluídas.

Das curvas de consumo obtidas foram então escolhidas as que apresentavam uma melhor relação entre o erro e o seu desvio padrão e estivessem dentro dos parâmetros necessários para representar um consumo fisicamente real.

Para a viatura A foi escolhida a curva de consumo resultante do par de viagens 2.1 e 1.1, estando um erro associado de $1.9 \pm 7.5\%$. Para a viatura B a curva resulta do par de viagens 8.2 e 8.3, com um erro de $-3.8 \pm 11.8\%$. Para a viatura C a curva resulta do par de viagens 3.2 e 1.2, com um erro de $-1.6 \pm 3.8\%$. E por fim, a viatura D resulta do par de viagens 6.1 e 6.2, com um erro de $-3.9 \pm 8.8\%$.

Após validar a ferramenta, foi feita a selecção da melhor curva de cada viatura. Os coeficientes da curva de consumo que caracterizam cada viatura encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado dos coeficientes de cada viatura

Viatura	Coeficientes					
	a (g/s)	b $\frac{(g/s)}{(skW)^2}$	c $\frac{(g/s)}{skW}$	d (g/s)	e $\frac{(g/s)}{skW}$	d (g/s)
A	9.35×10^{-4}	1.69×10^{-5}	3.38×10^{-4}	2.63×10^{-3}	6.77×10^{-4}	9.35×10^{-4}
B	2.27×10^{-3}	9.99×10^{-6}	2×10^{-4}	3.27×10^{-3}	4×10^{-4}	2.27×10^{-3}
C	1.77×10^{-4}	1.95×10^{-5}	3.9×10^{-4}	2.13×10^{-3}	7.8×10^{-4}	1.77×10^{-4}
D	1.75×10^{-3}	8.16×10^{-6}	1.63×10^{-4}	2.57×10^{-3}	3.26×10^{-4}	1.75×10^{-3}

Os fatores mencionados na Tabela 13 resultam nas curvas de consumo apresentadas na Figura 10.

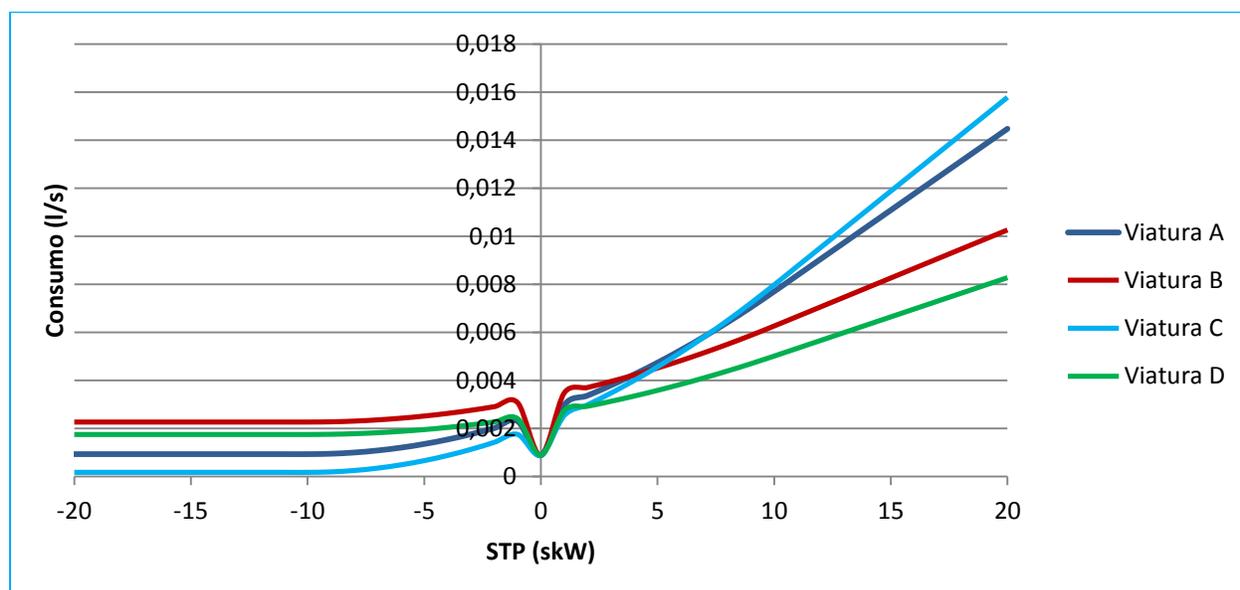


Figura 10 - Curvas de consumo das várias viaturas caracterizadas

Embora as viaturas sejam idênticas duas a duas, estas apresentam curvas de consumo diferentes, mas quando calculados os diversos consumos teóricos verificou-se que, agrupando as viaturas por

motorizações, os consumos de combustível apresentados por viaturas com a mesma motorização apresentam consumos semelhantes.

Ao avaliar a diferença de consumos entre as duas motorizações testadas, as viaturas equipadas com o motor OM 906 consomem menos 7.1 ± 0.6 l/100km relativamente às equipadas com o motor OM 457.

Já quando comparadas as viaturas individualmente, para a média de todas as viagens testadas, o consumo médio teórico da viatura A é de 47.4 ± 4.5 l/100km, da viatura B de 51.5 ± 4.4 l/100km, da viatura C de 42.7 ± 4.3 l/100km e da viatura D de 42.0 ± 3.6 l/100km.

Na Tabela 14 apresentam-se os valores de consumo de combustível estimados para os vários autocarros e para cada uma das 20 viagens realizadas.

Tabela 14 - Consumo de combustível estimado para cada viatura em cada viagem

Número viagem	Código viagem	A (l/100km)	B (l/100km)	C (l/100km)	D (l/100km)
1	5.1	33.1	35.0	30.3	28.6
2	2.1	24.6	26.2	22.4	21.2
3	4.1	43.8	46.9	39.8	38.0
4	3.1	37.6	40.9	33.9	33.6
5	1.1	39.9	44.1	35.5	35.9
6	8.1	35.9	39.2	32.2	31.7
7	7.1	24.7	28.8	21.4	24.0
8	8.2	35.5	39.6	31.4	32.2
9	8.3	38.9	41.3	35.5	33.6
10	7.2	31.6	34.3	28.5	27.9
11	2.2	26.0	27.7	23.7	22.5
12	5.2	29.3	31.8	26.5	26.0
13	4.2	46.3	48.5	42.6	39.3
14	3.2	37.5	42.7	32.7	34.9
15	1.2	40.6	43.6	36.9	35.8
16	6.1	32.6	36.7	28.7	29.8
17	6.2	24.8	25.8	22.9	21.2
18	6.3	31.3	35.3	27.5	28.6
19	6.4	34.9	35.9	32.4	29.2
20	6.5	32.3	35.6	28.8	28.8

De forma a melhor interpretar os valores dos consumos estimados em cada uma das viagens, organizaram-se as viagens pelas respectivas carreiras. Como todas as carreiras foram realizadas no mínimo duas vezes, calculou-se o consumo médio de cada carreira para cada par de viaturas com motorizações idênticas e também para cada uma das viaturas individualmente.

Assim, conseguiu-se ter uma percepção se as viaturas dentro da mesma gama de motorizações teriam consumos muito diferentes e também qual a diferença entre a média de consumo de combustível calculada para cada tipo de motorização.

Na Figura 11 podemos observar o consumo de combustível e respectivo desvio padrão de cada uma das viaturas em cada carreira, enquanto na Figura 12 podemos observar o consumo de combustível e respectivo desvio padrão de cada família de motorizações.

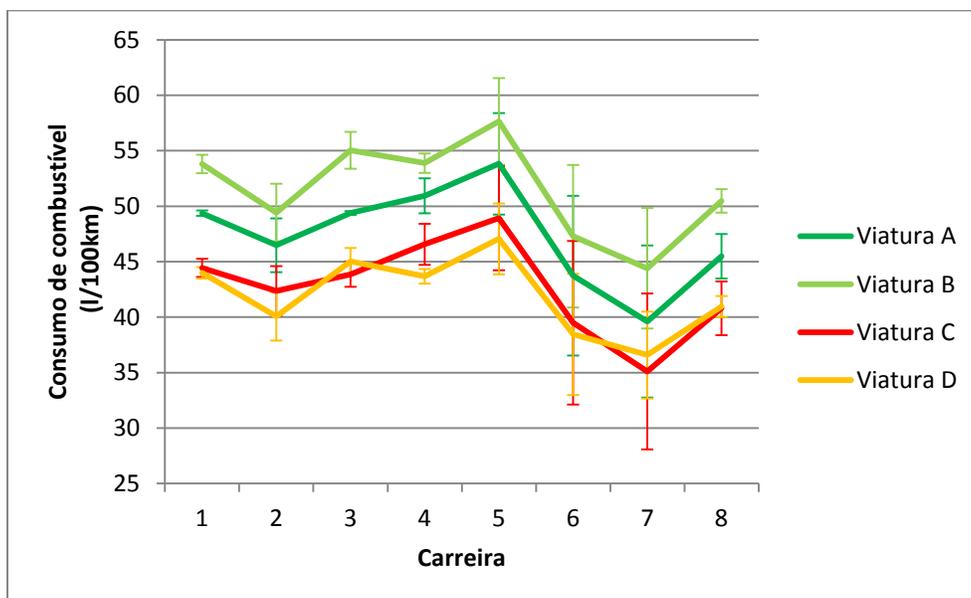


Figura 11 - Consumo médio de combustível previsto por viatura

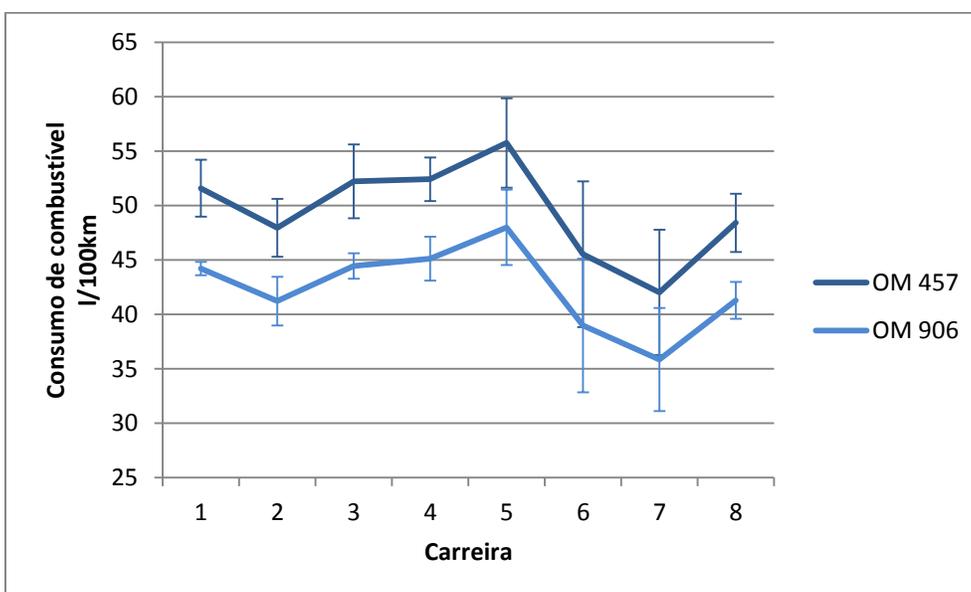


Figura 12 - Consumo médio de combustível previsto por motorização

De referir que os consumos mais elevados de combustível estimados da viatura B comparados com os consumos da viatura A, viatura da mesma família, podem estar associados às condições ambientais em que a viatura B foi testada. Tendo sido testada numa semana com temperaturas elevadas, pode ter exigido uma maior utilização da potência no sistema de refrigeração, fazendo assim aumentar o consumo.

Como se pode observar, qualquer que seja a carreira efectuada, as viaturas C e D (motorização OM 906) tendem a ter um consumo sempre inferior às viaturas A e B (motorização OM 457).

Assim sendo, analisou-se se haveria circunstâncias onde as viaturas menos potentes (210kW) pudessem não ser as indicadas para os percursos efectuados pelas viaturas mais potentes (260kW), por uma maior exigência do percurso. Para tal, recorreu-se à equação 7, de forma a perceber se as gamas de potência utilizadas nessas viagens estariam muitas vezes acima da potência disponível nas viaturas com motorizações OM 906.

Assim, foi tido em conta que todos os valores de potência que apresentavam valores superiores à potência disponível (260kW) foram excluídos, não entrando para os cálculos. Estes valores excluídos representam valores que têm algum tipo de erro associado, normal neste tipo de testes, que se pode dar por algum ruído existente na recolha dos dados.

Pretende-se, deste modo, ter uma estimativa de quais as viagens realizadas pelas viaturas da família OM 457 que exigem um maior esforço.

Na Tabela 15 encontram-se as percentagens de tempo em que foi requerida uma potência maior do que a disponível nas viaturas menos potentes (210kW).

Tabela 15 - Percentagem temporal em que a motorização OM 906 requer mais potência do que a disponível nas viagens realizadas pela motorização OM 457

Viagem	Código viagem	% tempo em que potência > 210 kW
1	5.1	2.8
2	2.1	3.8
3	4.1	3.7
4	3.1	2.4
5	1.1	2.0
6	8.1	2.3
7	7.1	0.3
8	8.2	2.5
9	8.3	3.1
10	7.2	2.4

Nenhuma das viagens realizadas pelas motorizações OM 457 requer grandes percentagens de tempo, ao longo de cada viagem, em que utilizem a potência disponível a mais do que na motorização OM 906, sendo que o máximo de tempo requerido com potências superiores a 210kW é de 6.3% na viagem 6 da Tabela 15.

Visto que as viagens de 1 a 5 (Tabela 15) foram carreiras também realizadas com uma viatura menos potente (OM 906) e que não se verificou uma necessidade de utilização de uma viatura mais potente nesse meio, considerou-se que uma viatura OM 906 também teria capacidades para executar tais percursos, dado que as viagens de 6 a 10 (carreiras executadas exclusivamente com uma viatura OM 457) têm percentagens de utilização de potência superior a 210 kW idênticas às das viagens 1 a 5.

Deste modo, constata-se que, caso fosse possível, todas as carreiras seriam realizadas por viaturas com a motorização OM 906, pois a potência extra disponível nas viaturas com a motorização OM 457 não é justificável para as carreiras testadas.

Não o sendo, dado que a Rodoviária de Lisboa tem à disposição ambas as motorizações, foram analisadas as carreiras onde as viaturas de motorização OM 457 teriam um maior diferencial no impacte ambiental comparado com a motorização OM 906, analisando quais os fatores com maior influência na diferença de consumos entre motorizações.

5.2. Medidas de alocação

Para melhor compreensão do comportamento das viaturas nas diversas carreiras, optou-se por analisar vários critérios que se pudessem associar aos diferentes consumos de combustível estimados. Teve-se por base as caracterizações das viaturas, para analisar comportamentos dinâmicos de consumos, e as caracterizações de cada carreira, para analisar a topografia dos trajetos, o contexto urbano/suburbano e a dinâmica dos passageiros.

Como tal, os critérios avaliados foram:

- velocidade média e operacional;
- tempo ao ralenti;
- contexto urbano ou suburbano;
- declive do trajeto; e
- número de passageiros.

5.2.1. Análise dos critérios selecionados

A velocidade média foi calculada tendo em consideração o tempo em que a viatura esteve em funcionamento e a distância percorrida, e também a média de registos de velocidade instantânea. Já a velocidade operacional foi calculada desde que a viatura começou a sua viagem até regressar e terminar

o serviço, tendo neste caso contabilizado possíveis períodos de tempo em que a viatura esteve parada e desligada.

Na Tabela 16, encontram-se os valores das velocidades de cada viagem realizada.

Tabela 16 - Velocidade média e velocidade operacional de cada viagem

Viatura	Carreira	Código Viagem	Velocidade Média (km/h)	Velocidade Operacional (km/h)
1	5	5.1	16.30 ± 0.15	16.19
1	2	2.1	22.25 ± 0.06	21.71
1	4	4.1	19.34 ± 0.07	18.86
1	3	3.1	16.81 ± 0.01	14.85
1	1	1.1	17.29 ± 0.12	15.93
2	8	8.1	20.71 ± 0.04	19.04
2	7	7.1	18.26 ± 0.01	18.21
2	8	8.2	19.27 ± 0.08	18.44
2	8	8.3	19.59 ± 0.03	18.82
2	7	7.2	19.85 ± 0.01	18.36
3	2	2.2	20.12 ± 0.08	18.20
3	5	5.2	17.38 ± 0.06	17.38
3	4	4.2	19.66 ± 0.00	19.00
3	3	3.2	16.01 ± 0.02	14.38
3	1	1.2	17.42 ± 0.01	14.95
4	6	6.1	21.08 ± 0.08	18.25
4	6	6.2	16.24 ± 0.10	15.17
4	6	6.3	22.50 ± 0.09	18.48
4	6	6.4	23.77 ± 0.02	19.21
4	6	6.5	23.14 ± 0.05	20.68

Os dados apresentados são respeitantes a cada viagem e não à média efetuada na carreira, pois assim possibilita perceber quais as viagens com tráfego mais acentuado dentro das mesmas carreiras.

Assim sendo, a velocidade média pode também ser influenciada pelo tempo ao *ralenti*, pois o tempo em que a viatura se encontra imobilizada, tanto no trânsito como na recolha e largada de passageiros, fazem com que a velocidade média da viagem diminua.

Na Figura 13 podemos ver os gráficos onde se encontram a velocidade média de cada percurso e respetivo tempo ao *ralenti*.

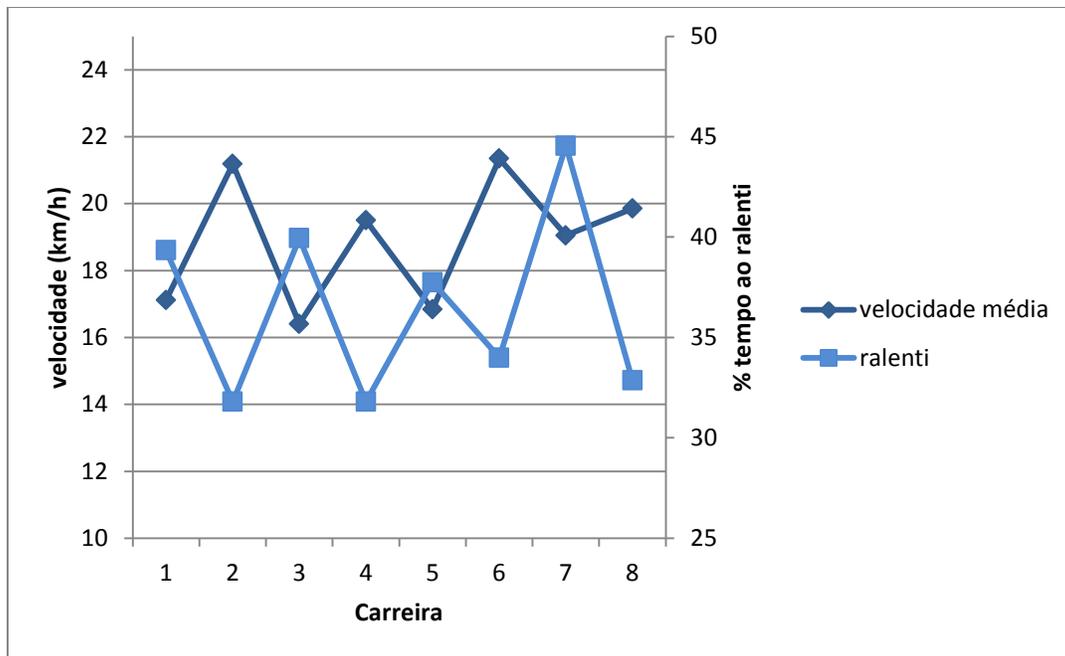


Figura 13 - Comparação entre o tempo ao ralenti e a velocidade média de cada carreira

Assim, quanto maior for o tempo ao ralenti menor será a velocidade média de cada carreira, caso tal não se verificasse podíamos estar perante viagens que circulam em ambientes muito diferentes e não só entre meio urbano/suburbano.

Outro dos critérios analisado foi o contexto das diversas carreiras. Utilizando por base a avaliação feita de cada carreira, obteve-se a percentagem de percurso efectuado em meio suburbano e em meio urbano. Para facilitar a percepção dos percursos com maior percentagem de urbanidade, na Figura 14 são apresentadas apenas as percentagens de cada carreira em meio urbano.

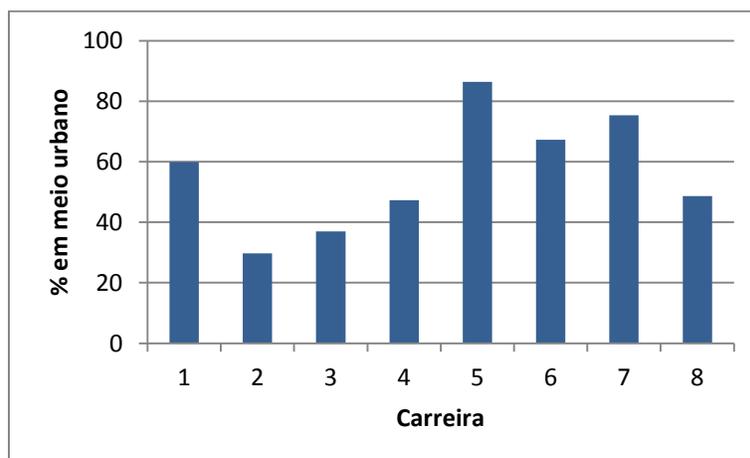


Figura 14 - Análise temporal em meio urbano de cada carreira

Nas carreiras, embora todas elas tenham percursos entre zonas urbanas e suburbanas, são notórias as diferenças de tempo que cada uma delas passa em cada contexto. Sendo que a percentagem de tempo em meio urbano varia entre 30 a 86%, a carreira mais urbana (carreira 5), destaca-se também por ser uma das que apresenta menor velocidade média (16.84km/h) enquanto a carreira mais suburbana (carreira 2) por ser uma das que apresenta maior velocidade média (21.19km/h).

Da mesma forma que foi feita a análise ao contexto urbano/suburbano do percurso, dos dados da avaliação feita a cada carreira, avaliaram-se também os percursos relativamente ao declive, considerando-se como tal a soma dos valores de declive menores que -4% e maiores que +4%. Na Figura 15 encontram-se as percentagens de declive de cada carreira.

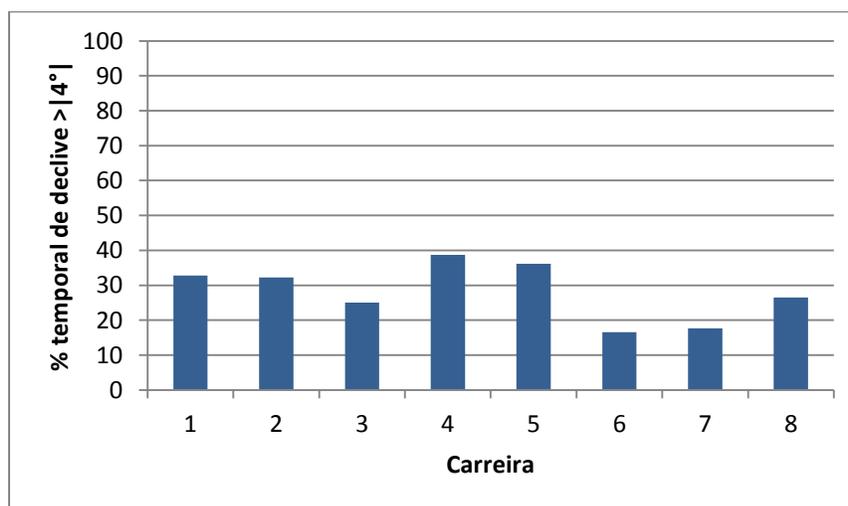


Figura 15 - Análise temporal do declive em cada carreira

A variação de declive entre carreiras pode ser um dos principais fatores a ter em consideração quando feita a alocação das viaturas, pois, normalmente, as carreiras com maior declive são aquelas em que se observa uma maior potência requerida ao longo do seu percurso.

Tal como o declive, o número de passageiros pode também ser um critério crucial na escolha da melhor motorização a utilizar em cada percurso. Assim sendo, analisou-se o número máximo de passageiros, em média, a bordo de cada carreira, com respectivo desvio, de modo a perceber se a potência adicional requerida deveria ser tida em conta na escolha da viatura. Os resultados encontram-se na Figura 16.

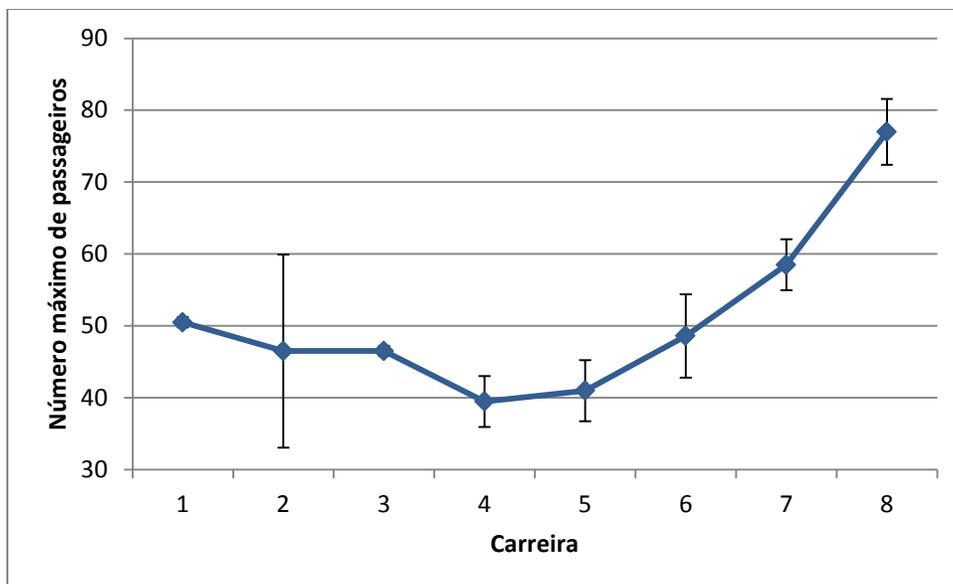


Figura 16 - Média do número máximo de passageiros e respetivo desvio padrão por carreira

5.2.2. Avaliação das linhas de tendência entre os vários critérios e o consumo de combustível

Para melhor perceber a influência de cada critério no consumo de combustível, criou-se, com base nos dados de consumo médio de cada motorização nas várias carreiras, uma linha de tendência com os diversos critérios.

Na Figura 17 encontram-se os dados referentes à linha de tendência entre o consumo médio de cada motorização em cada carreira e a velocidade média em cada carreira.

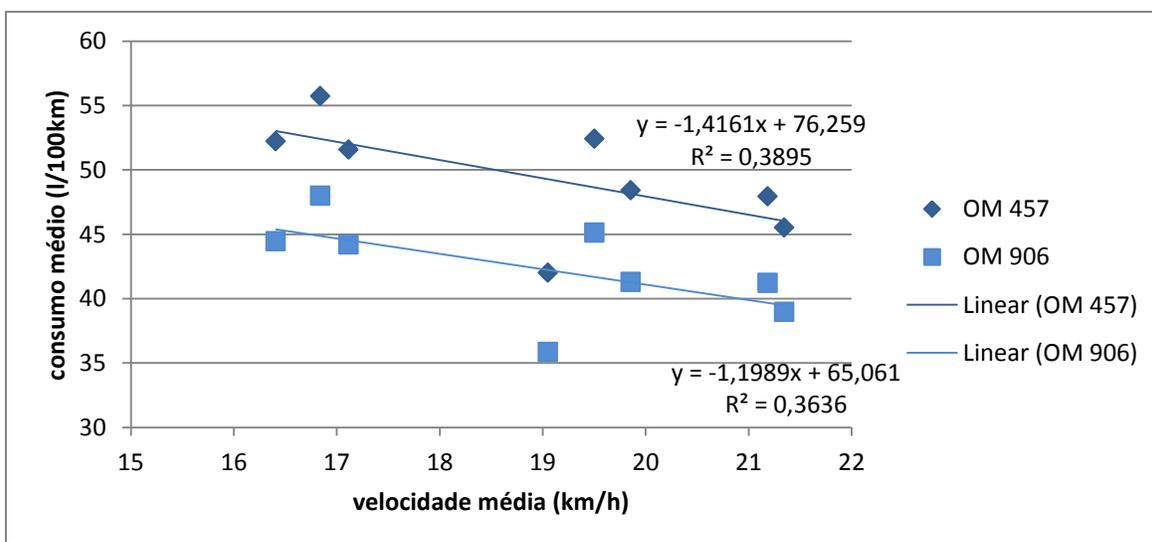


Figura 17- Linha de tendência entre a velocidade média e o consumo médio de combustível

Da análise dos dados referentes à velocidade média é perceptível uma clara relação com o consumo de combustível, sendo que quanto maior é a velocidade média menor é o consumo de combustível.

As viagens com velocidades médias menos elevadas, normalmente correspondem a carreiras com uma intensidade de tráfego mais intenso, passando mais tempo em situações de “para/arranca”, as quais envolvem potências elevadas por passar parte do seu tempo em acelerações e desacelerações. Tal só é verdade devido às baixas velocidades praticadas, por se inserirem em meios urbanos/suburbanos. Caso se estivesse perante percursos envolvendo estradas como vias rápidas ou auto-estradas a mesma conclusão já não poderia ser tirada, não só porque os motores estariam a trabalhar noutra regime, mas, principalmente, devido à força de resistência aerodinâmica (D) que aumenta quadraticamente com a velocidade, como demonstra a equação 9.

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A_f \quad (\text{eq. 9})$$

Como referido anteriormente, o tempo ao ralenti é um fator que tem também influência na velocidade média. Embora relacionados, não significa que os seus pesos, relativamente ao consumo de combustível, sejam iguais.

Na Figura 18 pode-se observar de que forma se relaciona o tempo ao *ralenti* e o consumo médio de cada motorização.

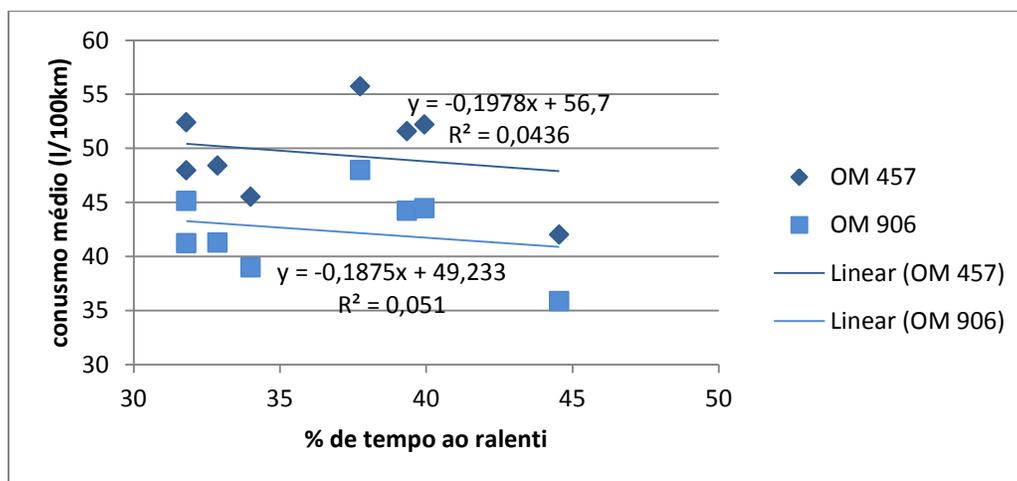


Figura 18 - Linha de tendência entre a percentagem de tempo ao *ralenti* e o consumo de combustível médio

Analisando os dados da Figura 18 pode-se observar que a tendência é a de que quanto maior é o tempo ao *ralenti*, menor é o consumo de combustível, embora o declive da linha de tendência seja pouco acentuado. Verifica-se também que os valores dos resultados se encontram bastante dispersos, apresentando valores de coeficientes de determinação, R^2 , bastante baixos.

Deste modo, considerou-se que os dados referentes ao tempo ao *ralenti* não seriam um fator conclusivo, dando uma maior ênfase aos dados relativos à velocidade média de cada carreira, pois dada a sua relação, de acordo com os dados da Figura 17 e Figura 18, estes são contraditórios, pois o consumo deveria descer quando a velocidade média aumenta, ou seja, quando o tempo ao *ralenti* é menor, como se pode verificar na Figura 13.

No que diz respeito ao contexto urbano foi também analisada qual a tendência relativamente ao consumo de combustível.

Na Figura 19 encontram-se os dados referentes à relação entre a percentagem de tempo em contexto urbano e o consumo de combustível.

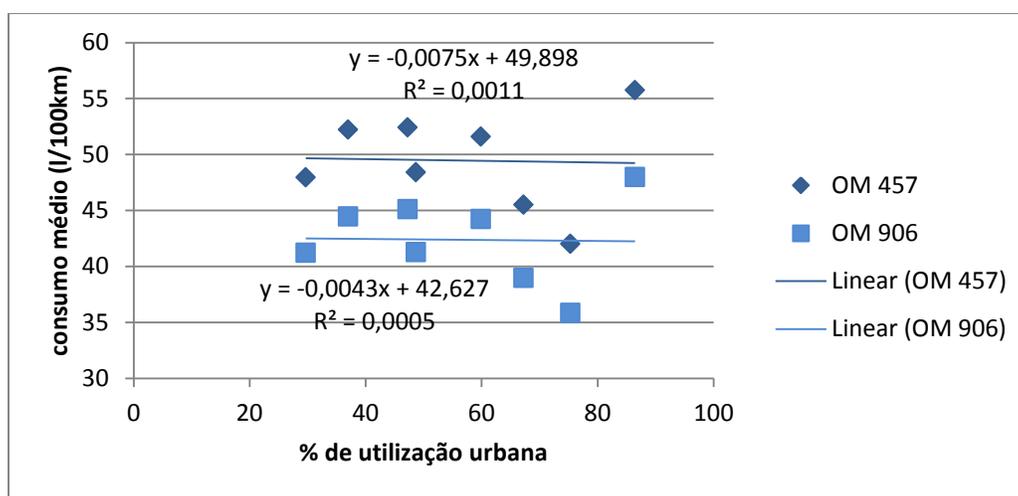


Figura 19 - Linha de tendência entre percentagem temporal de utilização em meio urbano e o consumo de combustível médio

Observa-se que a linha de tendência é praticamente constante e com valores de coeficientes de determinação, R^2 , bastante baixos.

Deste modo, como as carreiras apenas circulam entre meio urbano e suburbano, verifica-se que o facto de um percurso ter uma percentagem maior de meio urbano ou suburbano não é um fator que influencie o consumo de combustível.

O declive é dos factores que apresenta uma linha de tendência mais acentuada e com valores de coeficientes de determinação, R^2 , mais elevados.

Na Figura 20 podemos ver os dados referentes à linha de tendência respeitante ao declive.

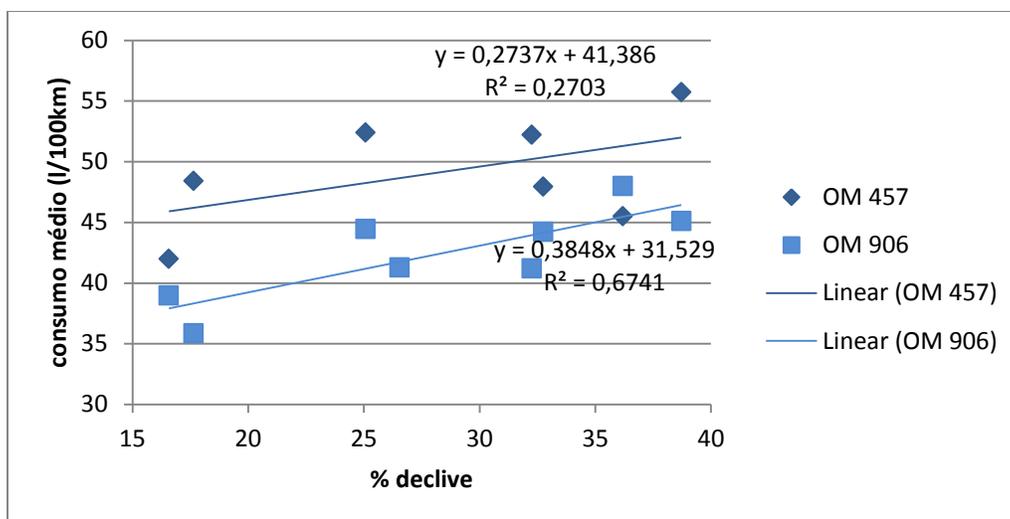


Figura 20 - Linha de tendência entre percentagem temporal de declive e o consumo de combustível médio

Pode-se observar que quanto maior a percentagem de percurso em declive, maior a proximidade entre as linhas de tendência de cada motorização, o que seria previsível dado que os percursos com maior percentagem de percurso em declive são, de modo geral, mais exigentes, sendo percursos que requerem uma maior potência a utilizar por parte das viaturas. Deste modo, as viaturas menos potentes acabam por estar mais tempo a trabalhar perto da potência máxima, estando o motor a funcionar em regimes mais elevados de rotação, enquanto nas viaturas mais potentes tal não acontece, estando a funcionar em regimes menos elevados dadas as características do motor.

O último critério utilizado para avaliar as variações dos consumos de combustível foi o número de passageiros, para tentar avaliar de que forma uma viagem com maior carga tem um consumo mais elevado do que uma viagem com uma carga mais baixa.

Na Figura 21 encontram-se os dados referentes à linha de tendência entre o consumo médio de cada motorização em cada carreira e a quantidade máxima de passageiros transportados.

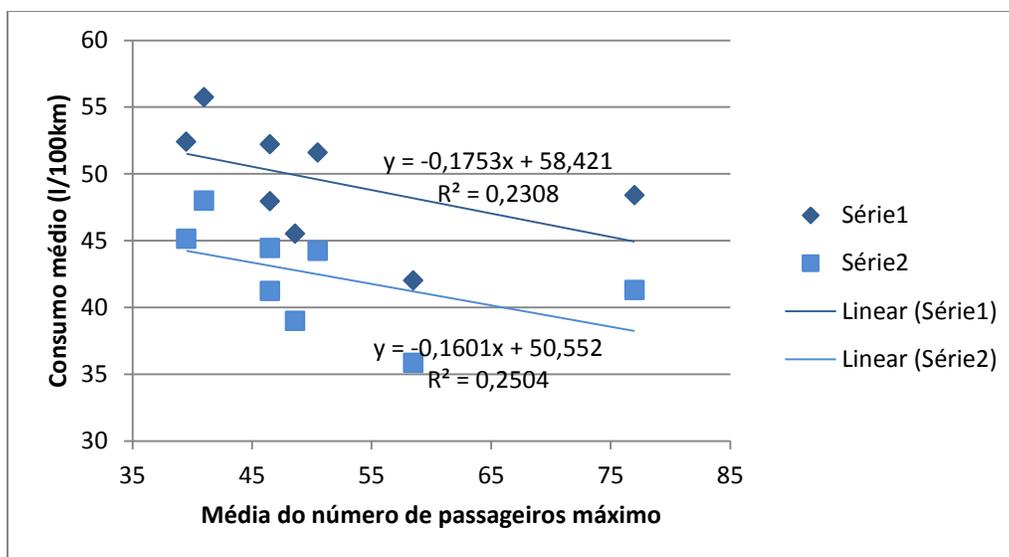


Figura 21 - Linha de tendência entre a média máxima de passageiros e o consumo médio de combustível

Embora os dados apresentados aparentem ser bons resultados para uma análise da relação entre o consumo de combustível e a quantidade de passageiros transportados, este critério foi rejeitado, visto que o aumento de carga deveria ser um critério que faria aumentar os consumos, dada a carga extra na viatura (ou seja, a linha de tendência apresentar um declive positivo), o que não se verifica.

Optou-se por analisar os dados referentes aos critérios de velocidade média e de declive, por serem os que mostram resultados com comportamentos mais lineares quando relacionados com os consumos de combustível.

Na Tabela 17 temos as equações das linhas de tendência de cada motorização para cada um dos critérios escolhidos.

Tabela 17 – Equações das linhas de tendência dos critérios selecionados

Critério	Motorização	Equação	Intervalo válido
Velocidade média (v) em km/h	OM 906	$cons. = -1.1989v + 65.061$]16.6 , 38.7[
	OM 457	$cons. = -1.4161v + 76.259$	
% de declive (d)	OM 906	$cons. = 0.3848d + 31.529$]16.4 , 21.4[
	OM 457	$cons. = 0.2737d + 41.386$	

Estas retas, apesar de apresentarem resultados de consumos de combustível diferente dos consumos estimados, conseguem representar a evolução dos consumos relativamente aos critérios selecionados.

Na Figura 22 observa-se o consumo de cada motorização em cada carreira conjuntamente com a influência do declive.

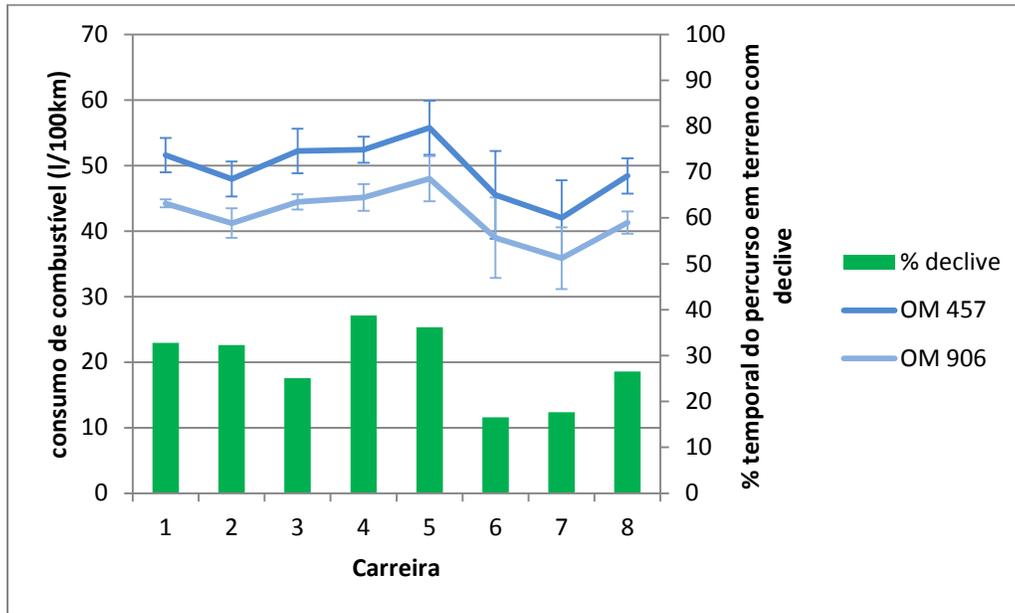


Figura 22 - Consumo médio de combustível previsto por motorização e declive das carreiras

Na Figura 23 observa-se o consumo de cada motorização em cada carreira conjuntamente com a influência da velocidade média de cada carreira.

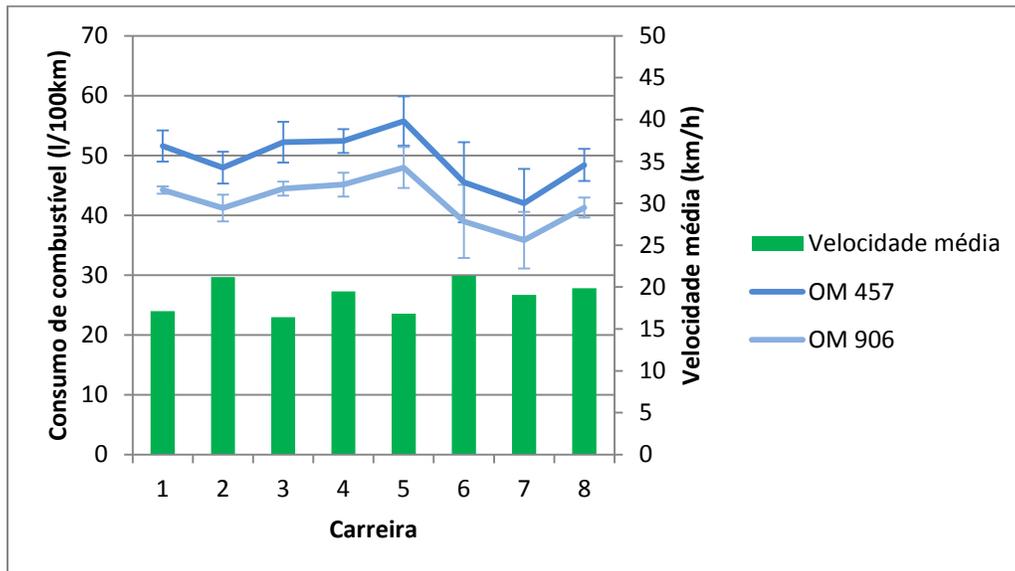


Figura 23 - Consumo médio de combustível previsto por motorização e velocidade média das carreiras

5.3. Aplicação da alocação das viaturas

Para fazer a alocação das viaturas são apresentadas três hipóteses, sendo que no final serão apenas tiradas conclusões com base nos consumos previstos, pois não são conhecidos quais os eventuais custos associados a cada tipo de alocação.

Na Tabela 18 são apresentados os valores reais dos testes realizados em cada viagem e com que motorização.

Tabela 18 - Valores dos consumos reais de combustível em cada viagem

Código viagem	Centro	Motor utilizado	Distância percorrida (km)	Consumo real (l)	Consumo real (l/100km)
5.a	Caneças	OM 457	58	34.6	59.7
2.a	Caneças	OM 457	55	24.6	44.8
4.a	Caneças	OM 457	88	44.2	50.2
3.a	Caneças	OM 457	76	32.7	43.1
1.a	Caneças	OM 457	81	39,9	49.2
8.a	Santa Iria	OM 906	79	35.6	45.1
7.a	Santa Iria	OM 906	71	36.8	51.8
8.b	Santa Iria	OM 906	79	39.6	50.1
8.c	Santa Iria	OM 906	80	41.3	51.7
7.b	Santa Iria	OM 906	71	37.0	52.1
2.b	Caneças	OM 457	54	24.6	45.6
5.b	Caneças	OM 457	58	28.4	49.0
4.b	Caneças	OM 457	89	41.5	46.6
3.b	Caneças	OM 457	76	32.7	43.1
1.b	Caneças	OM 457	82	36.9	45.0
6.a	Santa Iria	OM 906	80	29.8	37.3
6.b	Santa Iria	OM 906	44	21.2	48.1
6.c	Santa Iria	OM 906	81	31.1	38.4
6.d	Santa Iria	OM 906	81	35.2	43.4
6.e	Santa Iria	OM 906	81	27.3	33.7
Total			<u>1464</u>	<u>675.1</u>	<u>46.1</u>

Nestas 20 viagens de teste foram consumidos 675l de combustível e percorridos 1464km, representando um consumo médio de 46.1l/100km, o que, comparado com os valores apresentados na Figura 5 do capítulo 3, corresponde a uma boa aproximação à realidade da Rodoviária de Lisboa que, em 2017, teve um consumo médio de combustível de 46.1l/100km.

Para melhor análise das alocações efetuadas, na Tabela 19 encontram-se os valores dos consumos médios de combustível estimados para cada viatura, por carreira, com a respectiva variação de

consumos entre cada motorização, sendo o “ Δ consumo” a diferença entre o consumo médio da motorização OM 457 e o da OM 906.

Tabela 19 – Consumos previstos de combustível previstos por carreira para cada motorização

Carreira	Distância percorrida (km)	Consumo (l)			Consumo (l/100km)		
		OM 906	OM 457	Δ cons.	OM 906	OM 457	Δ cons.
1	81	35.8±0.5	41.8±2.1	6.0	44.2±0.6	51.6±2.6	7.4
2	54	22.3±1.2	25.9±1.4	3.6	41.2±2.2	48.0±2.7	6.7
3	76	33.8±0.9	39.7±2.6	5.9	44.5±1.2	52.2±3.4	7.8
4	88	39.7±1.8	46.1±1.8	6.4	45.1±2.0	52.4±2.0	7.3
5	58	27.8±2.0	32.3±2.4	4.5	48.0±3.5	55.7±4.1	7.8
6	80	31.2±4.9	36.4±5.4	5.2	39.0±6.1	45.5±6.7	6.5
7	71	25.5±3.4	29.8±4.1	4.4	35.9±4.7	42.0±5.8	6.2
8	79	32.6±1.3	38.2±2.1	5.6	41.3±1.7	48.4±2.7	7.1

5.3.1. Hipótese de alocação 1

Como primeira hipótese, sabendo que as viaturas da Rodoviária de Lisboa são pintadas de acordo com o centro em que são inseridas e que existem viaturas com ambas as motorizações em ambos os centros, é estudada uma alocação com viaturas com ambas as motorizações em ambos os centros.

Embora tenham sido analisados os vários fatores que poderiam influenciar os consumos de combustível, na prática, esses critérios só são aplicáveis quando existir uma indecisão na alocação.

Ter-se-á em consideração que, na realidade, as viaturas mais potentes serão alocadas nos percursos que apresentam uma menor distância a percorrer, com o objectivo de obter o menor consumo possível.

Na Tabela 20 podemos analisar qual o consumo de combustível previsto com a alocação. A distância percorrida em cada carreira é a soma da distância efectuada nas diversas viagens de teste realizadas nessa carreira. Conhecendo-se o consumo médio, em litros por cada 100km, de cada motorização em cada carreira, estimou-se o consumo de combustível consumido, em litros, sabendo os quilómetros realizados no total em cada carreira.

Tabela 20 - Alocação das viaturas e respectivo consumo

Carreira	Motorização	Consumo (l/100km)	Distância percorrida (km)	Consumo min. (l)	Consumo médio (l)	Consumo max. (l)
1	OM 906	44.2±0.6	163	71.1	72.1	73.1
2	OM 457	48.0±2.7	109	49.4	52.3	55.2
3	OM 457	52.2±3.4	152	74.2	79.4	84.5
4	OM 906	45.1±2.0	177	76.3	79.9	83.4
5	OM 457	55.7±4.1	116	59.9	64.7	69.4
6	OM 906	39.0±6.1	367	120.5	143.1	165.6
7	OM 457	42.0±5.8	142	51.5	59.7	67.8
8	OM 906	41.3±1.7	238	94.3	98.3	102.3
Total			1464	597.1	649.2	701.4

Neste caso, sabendo que foram percorridos, nos ensaios, 1464km, o consumo estimado pode variar entre os 597.1l e os 701.4l, apresentando um valor médio de 649.2l. Tendo em consideração este valor, obtém-se uma média de 44.3l/100km. Comparados o valor de consumo estimado com o valor de consumo real nos ensaios, perante a alocação proposta prevê-se uma poupança de 3.8±3.9% de combustível.

No que se refere a poluentes ambientais, utilizando o valor de redução de consumo médio e os valores apresentados na Tabela 11, obtém-se as reduções apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Redução de emissões da hipótese de alocação 1

Redução de	Por cada 100km
Combustível (l)	1.77
Combustível (kg)	1.51
CO ₂ (kg)	4.74
CO (g)	11.44
NO _x (g)	50.38
PM (g)	1.42

Anualmente a Rodoviária de Lisboa efetua cerca de 17×10⁶km, dados referentes a 2017. Com a alocação sugerida, utilizando os valores de consumo de combustível total médio dos ensaios, o consumo de combustível tende a reduzir 3.8%, comparativamente com o consumo real efectuado nos mesmos ensaios. Como as viaturas Mercedes-Benz Citaro representam a maioria da frota, a redução no consumo de 3.8% pode representar cerca de 301 000 litros/ano, o que, a nível de emissões de poluentes, representa uma redução média de 805 toneladas/ano de emissões de CO₂, 1 946 kg/ano de CO, 8 565kg/ano de NO_x e 241 kg/ano de partículas.

Tendo por base o preço de custo médio do gasóleo, em 2018 e para Rodoviária de Lisboa, de cerca de 1€/l, a estimativa com base na redução média de combustível prevista representa cerca de 301 000€/ano.

5.3.2. Hipótese de alocação 2

A segunda hipótese passa por analisar qual a melhoria de eficiência energética no caso das viaturas com a mesma motorização serem todas alocadas ao mesmo centro.

Para tal, não é tida em consideração a dimensão da frota em cada centro, nem o número de viaturas existentes com cada motorização.

Neste caso, existem duas possibilidades: ou se colocam todas as viaturas com motorização OM 906 em Santa Iria e todas as com motorização OM 457 em Caneças, ou vice-versa. Deste modo, pretende-se avaliar se a alocação das viaturas por centro corresponde a reduções significativas no consumo.

Na Tabela 22 e na Tabela 23 encontram-se as duas possibilidades referidas acima.

Tabela 22 - Alocação da OM 906 em Santa Iria e da OM 457 em Caneças

Carreira	Motorização	Consumo (l/100km)	Distância percorrida (km)	Consumo min. (l)	Consumo médio (l)	Consumo max. (l)
1	OM 457	51.59±2.6	163	79.8	84.1	88.4
2	OM 457	48.0±2.7	109	49.4	52.3	55.2
3	OM 457	52.2±3.4	152	74.2	79.4	84.5
4	OM 457	52.4±2.0	177	89.2	92.8	96.3
5	OM 457	55.7±4.1	116	59.9	64.7	69.4
6	OM 906	39.0±6.1	367	120.5	143.1	165.6
7	OM 906	35.9±4.7	142	44.2	50.9	57.6
8	OM 906	41.3±1.7	238	94.3	98.3	102.3
Total			<u>1464</u>	<u>611.5</u>	<u>665.4</u>	<u>719.3</u>

Tabela 23 - Alocação da OM 457 em Santa Iria e da OM 906 em Caneças

Carreira	Motorização	Consumo (l/100km)	Distância percorrida (km)	Consumo min. (l)	Consumo médio (l)	Consumo max. (l)
1	OM 906	44.2±0.6	163	71.1	72.1	73.1
2	OM 906	41.2±2.2	109	42.5	44.9	47.4
3	OM 906	44.5±1.2	152	65.8	67.6	69.3
4	OM 906	45.1±2.0	177	76.3	79.9	83.4
5	OM 906	48.0±3.5	116	51.7	55.7	59.7
6	OM 457	45.5±6.7	367	142.5	167.1	191.7
7	OM 457	42.0±5.8	142	51.5	59.7	67.8
8	OM 457	48.4±2.7	238	108.8	115.2	121.6
Total			1464	610.0	662.0	714.0

As soluções apresentadas são bastante idênticas, embora haja um ligeiro ganho optando por alocar as viaturas OM 457 em Santa Iria e as OM 906 em Caneças, isto se não forem tidos em consideração os quilómetros realizados em cada centro. Neste caso, a redução de consumo seria de $1.9\pm 7.7\%$, comparativamente com $1.4\pm 5.3\%$ para a solução de alocar as viaturas OM 457 em Caneças e as OM 906 em Santa Iria. Estas soluções são menos vantajosas do que a alocação da hipótese 1 e corre-se o risco de que esta apresente consumos mais elevados do que os apresentados antes da alocação.

Para o caso de alocação da Tabela 22, o consumo médio estimado é de 45.5l/100km, representando uma redução de cerca de 112 000l/ano, o que corresponde a cerca de 112 000€/ano. Quanto à redução média de emissões poluentes, a mesma é de 301 toneladas/ano de emissões de CO₂, 725 kg/ano de CO, 3 146 kg/ano de NO_x e 90 kg/ano de partículas.

Para o caso de alocação da Tabela 23, o consumo médio estimado é de 45.2l/100km, representando uma redução de cerca de 151 000l/ano, ou seja, cerca de 151 000€/ano. A redução média de emissões poluentes é de 405 toneladas/ano de emissões de CO₂, 978 kg/ano de CO, 4 307 kg/ano de NO_x e de 121 kg/ano de partículas.

Assim sendo, a solução de alocar as viaturas de acordo com o centro não aparenta ser a solução mais viável, comparando com a alocação da hipótese 1.

5.3.3. Hipótese de alocação 3

Esta terceira hipótese corresponde a equipar todas as viaturas com a motorização OM 906. Tal opção deve-se a não se ter encontrado nenhuma razão plausível para a utilização da motorização OM 457, que invalide a utilização das viaturas menos potentes (OM 906) nas carreiras testadas.

Deste modo, são apresentados os resultados desta hipótese na Tabela 24.

Tabela 24 - Alocação exclusivamente com viaturas OM 906 e respectivo consumo

Carreira	Motorização	Consumo (l/100km)	Distância percorrida (km)	Consumo min. (l)	Consumo médio (l)	Consumo max. (l)
1	OM 906	44.2±0.6	163	71.1	72.1	73.1
2	OM 906	41.21±2.2	109	42.5	45.0	47.4
3	OM 906	44.5±1.2	152	65.8	67.6	69.3
4	OM 906	45.1±2.02	177	76.3	79.9	83.4
5	OM 906	48.0±3.45	116	51.7	55.7	59.7
6	OM 906	39.0±6.1	367	120.5	143.1	165.6
7	OM 906	35.85±4.7	142	44.2	50.9	57.6
8	OM 906	41.3±1.7	238	94.3	98.3	102.3
Total			1464	566.3	612.3	658.4

A redução do consumo de combustível neste caso é de 9.3±6.8%, estimando-se em 612.3l o consumo médio de combustível para a realização das 20 viagens de testes, o que corresponde a 41.8l/100km.

Tal como foi efetuado nas restantes hipóteses, foi analisado qual o impacte ambiental a cada 100km, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Redução de emissões da hipótese de alocação 3

Redução de	Por cada 100km
Combustível (l)	4.30
Combustível (kg)	3.65
CO ₂ (kg)	11.46
CO (g)	27.67
NO _x (g)	121.83
PM (g)	3.43

Com a alocação sugerida, para os 17×10⁶km/ano, utilizando os valores de consumo de combustível total médio dos ensaios, o consumo de combustível tende a reduzir 9.3%, comparativamente com o consumo real efetuado nos mesmos ensaios, o que pode representar 727 000 litros/ano e uma poupança de cerca de 727 000 €/ano, obtendo-se igualmente uma redução de 1 849 toneladas/ano de emissões de CO₂, 4 704kg/ano de CO, 20 711kg/ano de NO_x e 583 kg/ano de partículas.

Esta hipótese, embora seja a mais vantajosa em termos ambientais e de eficiência energética, implica uma substituição de viaturas da frota, substituindo as de motorização OM 457 pelas de motorização OM 906, o que significa um forte investimento inicial.

6. Conclusões e trabalho futuro

Esta dissertação teve como objetivo fazer uma análise dos impactes ambientais e energéticos através da aplicação de medidas de alocação de veículos pesados de passageiros. O trabalho foi realizado no âmbito de um estágio realizado na Rodoviária de Lisboa, onde foram recolhidos todos os dados para a realização do mesmo. O programa de estágio resulta de uma parceria entre o Instituto Superior Técnico e a GALP ENERGIAS, projeto conhecido como Galp 21.

Durante o período de estágio foram realizadas 20 viagens em ambiente real, de forma a recolher informação relativa às viaturas e aos percursos seleccionados para este estudo. De forma a desenvolver uma ferramenta que cumprisse os objectivos estipulados, explorou-se qual seria a melhor forma de recolher os dados necessários para desenvolver uma metodologia que, com esses mesmos dados, permitisse explorar o comportamento das viaturas de forma a analisar e avaliar os perfis de consumo de combustível das viaturas. Foi criada então tal ferramenta para alocação de viaturas com o intuito de melhor compreender o comportamento das mesmas nas diversas carreiras.

Com a criação da ferramenta de alocação de viaturas, pretende-se estimar o consumo de combustível de cada viatura que foi caracterizada para, deste modo, alocá-las às rotas de forma a minimizar o consumo total de combustível. Neste caso, concluiu-se que, das viaturas testadas, as menos potentes teriam potência suficiente para assegurar o serviço necessário, apresentando consumos mais baixos do que as viaturas mais potentes. Esta ferramenta permite à empresa avaliar e decidir sobre a alocação das viaturas existentes, podendo também ajudar no processo de selecção de novas viaturas.

Foi feita a avaliação para o caso ideal, chegando-se à conclusão que, para a realidade da Rodoviária de Lisboa, as viaturas Mercedes-Benz Citaro equipadas com motorizações OM 906 seriam o suficiente para cumprir os requisitos do serviço prestado. Neste caso, prever-se-ia uma redução do consumo em $9.3 \pm 6.8\%$, o que representa uma poupança média de cerca de 727 000l/ano, o que corresponde a 727 000€/ano, e uma redução de 1 849 toneladas de emissões de CO₂, 4 704kg de CO, 20 711kg de NO_x e 583 kg de partículas.

Sabendo que na frota da Rodoviária de Lisboa se encontram também viaturas equipadas com a motorização OM 457, o desafio passou por saber onde as alocar de forma a conseguir o melhor resultado possível. Assim sendo, estas viaturas acabaram por ser alocadas nas carreiras mais curtas. Desta forma consegue-se uma poupança de combustível de cerca de $3,8 \pm 3,9\%$, representando uma diminuição média anual de 300 000 l/ano e uma poupança de 300 000€/ano, com uma redução de cerca de 805 toneladas de emissões de CO₂, 1 946 kg de CO, 8 565kg de NO_x e 241 kg de partículas.

Deste modo, pode-se verificar que a alocação de viaturas feita a este nível, embora seja algo que ainda não é recorrente na Rodoviária de Lisboa, tem potencial para ser aplicado de forma a melhorar a eficiência energética e a pegada ambiental da empresa. Para a implementação de medidas de alocação,

podem prever-se alguns problemas que não foram contabilizados na realização desta dissertação como a disponibilidade de viaturas, sendo que a melhor alocação num dado período pode não ser a mesma para um outro período. Tal pode dever-se a vários fatores como avarias ou períodos de manutenção das viaturas e, deste modo, ter de se alocar outra viatura que não a idealizada para essa rota. Outro fator a ter em consideração é o das viaturas não estarem todas em funcionamento em simultâneo, havendo também de gerir os horários de funcionamento de cada uma.

Para terminar este projeto, são apresentados alguns dos trabalhos futuros que se sugerem a desenvolver, de forma a dar continuidade ao até aqui realizado, os quais se destacam:

- Aumento do número de viaturas testadas — como método de melhorar a ferramenta aqui desenvolvida e para um melhor conhecimento da frota existente, criando uma base de dados com as caracterizações das restantes viaturas da empresa;
- Aumento do número das carreiras testadas — à semelhança do proposto para as viaturas, de forma a conhecer melhor os contextos das carreiras para uma alocação cada vez mais eficiente e mais precisa, proporcionando um conhecimento mais minucioso de todas as carreiras;
- Desenvolvimento de uma ferramenta de análise interna — de forma a melhorar os resultados obtidos, seria vantajoso analisar e cruzar a informação já disponível na empresa com a informação prestada pela ferramenta aqui utilizada, de forma até a automatizar o processo.

Bibliografia

- [1] Relatório do Estado do Ambiente, “PEGADA ENERGÉTICA E CARBÓNICA DOS TRANSPORTES.” [Online]. Available: <https://rea.apambiente.pt/content/pegada-energética-e-carbónica-dos-transportes>. [Accessed: 08-Oct-2018].
- [2] Eurostat, “Modal split of inland passenger transport, 2015.” [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Modal_split_of_inland_passenger_transport,_2015_\(%25_of_total_inland_passenger-kilometres\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Modal_split_of_inland_passenger_transport,_2015_(%25_of_total_inland_passenger-kilometres).png). [Accessed: 06-Oct-2018].
- [3] R. Hickman, D. Bonilla, M. Givoni, and D. Banister, *International Handbook on Transport and Development*. Edward Elgar Publishing, p. 43, 2015.
- [4] J. M. Anthony, E. W. Rosalie, and H. Simon, “Climate change and human health: present and future risks,” *Lancet*, vol. 368, p. 842, 2006.
- [5] PORDATA, “Preços médios de venda ao público dos combustíveis líquidos e gasosos – Continente.” [Online]. Available: <https://www.pordata.pt/Portugal/Pre%C3%A7os+m%C3%A9dios+de+venda+ao+p%C3%ABlico+dos+combust%C3%ADveis+l%C3%ADquidos+e+gasosos+%E2%80%93+Continente-1265-10032> [Accessed: 9-Dec-2018].
- [6] Board on Energy and Environmental Systems, *Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles*. Washington, DC: The National Academies Press.
- [7] Diário da República Eletrónico, “Portaria n.º 111/2015,” *Diário da República n.º 77/2015, Série I de 2015-04-21*. .
- [8] A. Wåhlberg, “Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback,” *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 37, pp. 333–343, 2007.
- [9] K. Boriboonsomsin, “Reducing the Carbon Footprint of Freight Movement through Eco---Driving Programs for Heavy---Duty Trucks A White Paper from the National Center for Sustainable Transportation,” p. 18, 2015.
- [10] EESI: Environmental and Energy Study Institute - Shefali Ranganathan, “Hybrid Buses: Costs and Benefits,” pp. 2–7, 2005.
- [11] M. Wachs, J. M. Samuels, and R. Skinner, *Hybrid-Electric Transit Buses: Status, Issues, and*

Benefits TCRP OVERSIGHT AND PROJECT SELECTION COMMITTEE, no. 59. 2000.

- [12] Eurostat, “Produção e importação de energia.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_production_and_imports/pt. [Accessed: 06-Oct-2018].
- [13] M. Mahmoud, R. Garnett, M. Ferguson, and P. Kanaroglou, “Electric Buses: A Review of Alternative Powertrains,” p. 22, 2016.
- [14] M. A. Symmons and G. Rose, “Ecodrive Training Delivers Substantial Fuel Savings for Heavy Vehicle Drivers,” pp. 46–53, 2009.
- [15] A. Ryosuke and N. Yasuhide, “A study on factors affecting the effective eco-driving,” 2012.
- [16] J. N. Barkenbus, “Eco-driving: An overlooked climate change initiative.” *Energy Policy*, vol. 38, pp. 762-769, 2010.
- [17] N. Lutsey, C.-J. Brodrick, D. SPERLING, and C. Oglesby, “Heavy-Duty Truck Idling Characteristics: Results From a Nationwide Truck Survey,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1880, pp. 29–38, 2004.
- [18] Voith, “Stop-Start Technology.” [Online]. Available: <http://voith.com/corp-en/drives-transmissions/automatic-transmissions-bus/stop-start-technology.html>. [Accessed: 06-Oct-2018].
- [19] J. A. D. C. de Almeida, “Análise de Eficiência Energética de Transportes Rodoviários,” p. 120, 2013.
- [20] L. Wolsey, *Integer Programming*. Wiley, 1998.
- [21] M. Mathirajan, “Optimal Allocation of Buses to depots - A Case Study,” no. January, pp. 235-236 1987.
- [22] J. Mahadikar, R. H. Mulangi, and T. G. Sitharam, “Optimization of bus allocation to depots by minimizing dead kilometers,” no. May, pp. 901–912, 2015.
- [23] R. Smit and N. Leonidas, “COPERT Australia: Developing Improved Average Speed Vehicle Emission Algorithms for the Australian Fleet,” *Conf. 19th Int. Transp. Air Pollut. Conf.*, 2012.
- [24] National Research Council, *Modeling Mobile-Source Emissions*. Washington, DC: The National Academies Press, 2000.
- [25] HBEFA, “HBEFA.” [Online]. Available: <http://www.hbefa.net/e/index.html>. [Accessed: 06-Oct-2018].

- [26] M. André, "The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions," *Sci. Total Environ.*, vol. 334–335, pp. 73–84, 2004.
- [27] Graz University of Technology, "Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3," 2009.
- [28] College of Engineering - Center for Environmental Research and Technology, "Comprehensive Modal Emission Model (CMEM)." [Online]. Available: <https://www.cert.ucr.edu/cmem/>. [Accessed: 06-Oct-2018].
- [29] Environmental Protection Agency, "MOVES2010 Highway Vehicle Population and Activity Data," 2010.
- [30] J. Yun, "Study of the Driving Cycle for Heavy Duty Trucks in Hilly Terrain and Its Effect on Calculated Emissions , and Comparison of Two Mobile Emission Models," 2012.
- [31] G. O. Duarte, G. A. Gonçalves, and T. L. Farias, "A methodology to estimate real-world vehicle fuel use and emissions based on certification cycle data," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 111, pp. 702–710, 2014.
- [32] Mercedes-Benz, "The Citaro." [Online]. Available: https://www.mercedes-benz.sk/content/media_library/hq/hq_mpc_reference_site/bus_ng/services_accessories/brochures/CITARO/citaro_technical_data_2009_ge_pdf.object-Single-MEDIA.tmp/16016_Techn_Info_Citaro_EN_low.pdf. [Accessed: 09-Oct-2018].
- [33] Mercedes-Benz, "The Citaro G." [Online]. Available: https://www.mercedes-benz.sk/content/media_library/hq/hq_mpc_reference_site/bus_ng/services_accessories/brochures/CITARO_G/citaro_g_technical_data_2009_en_pdf.object-Single-MEDIA.tmp/16016_Techn_Info_Citaro_G_EN_low.pdf. [Accessed: 09-Oct-2018].
- [34] RTP, "Portugueses são dos cidadãos com menor envergadura física da União Europeia." [Online]. Available: https://www.rtp.pt/noticias/pais/portugueses-sao-dos-cidadaos-com-menor-envergadura-fisica-da-uniao-europeia_n36638. [Accessed: 08-Oct-2018].
- [35] HPWizard.com, "Tire friction and rolling resistance coefficients." [Online]. Available: <http://hpwizard.com/tire-friction-coefficient.html>. [Accessed: 09-Oct-2018].
- [36] The Engineering ToolBox, "Drag Coefficient." [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html. [Accessed: 09-Oct-2018].
- [37] C. Kouridis *et al.*, "EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013 update Sept 2014 1," 2014.

