



Avaliação energética de medidas de eco-condução e de racionalização energética de frota de pesados de mercadorias

Rafael Franco Guerra Reis

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Patrícia de Carvalho Baptista

Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri

Presidente: Mário Manuel Gonçalves da Costa

Orientador: Patrícia de Carvalho Baptista

Vogal: Amílcar José Martins Arantes

Julho de 2016

Agradecimentos

Queria começar por agradecer ao Professor António Luís Moreira por me ter dado a conhecer o estágio Galp202020 no qual participei e no qual me foi possível recolher os dados necessários à realização desta dissertação.

Queria também agradecer à Galp e à Transportes Paulo Duarte e a todos os seus funcionários, em particular ao Engº António Fradique pelo apoio dado ao longo do estágio e pela ajuda na integração da empresa.

Finalmente queria agradecer aos meus orientadores Patrícia Baptista e Gonçalo Duarte pela dedicação mostrada durante a realização desta dissertação.

Resumo

Neste trabalho foram estimados os impactes energéticos e ambientais resultantes da implementação de medidas de eco-condução, de gestão de frota e da introdução de tecnologias alternativas. Para isso, foi implementado um procedimento experimental e metodologia de análise de dados para caracterizar o perfil de consumo das viaturas com base em medições em ambiente real de funcionamento. Foi também desenvolvida uma ferramenta que simula o efeito da eco-condução e a alocação de viaturas a serviços, de forma a avaliar os impactes da introdução das medidas individualmente e em conjunto.

Estas metodologias foram calibradas e validadas comparando as estimativas resultantes das ferramentas desenvolvidas com consumos reais, resultando num desvio médio de 4,9% para 19 viagens das viaturas a gasóleo. Concluiu-se que a eco-condução apresenta um potencial de redução de consumo de 3,1%, com um aumento do tempo de viagem de 0,3%. A alocação de viaturas contribuiu para uma redução de consumo de 2,3%, com um aumento do tempo de 0,1%. Quando combinadas, estas medidas resultam numa poupança de consumo de 5,6%.

Foi igualmente avaliado o desempenho do gás natural como combustível alternativo, mostrando ser uma opção viável, emitindo menos CO₂ (-10,4%), CO (-21,8%), NO_x (-59,5%) e PM (-97,8%) que uma viatura a gasóleo, apesar de evidenciar aumento das emissões de HC (+75,0%).

Desta forma, verifica-se que a introdução destas soluções possui um elevado potencial para tornar mais eficiente a operação da frota, sendo as ferramentas desenvolvidas neste trabalho importantes instrumentos de auxílio.

Palavras-chave: pesados de mercadorias, gasóleo, gás natural, eco-condução, alocação de viaturas, caracterização de veículos, ambiente real de condução.

Abstract

Energy and environmental impacts resulting from eco-driving, fleet management and alternative technologies were estimated in this work. An experimental procedure and data processing method were implemented to characterize the fuel consumption profiles of heavy-duty vehicles, based in real-world driving conditions. A tool was developed to simulate the effect of eco-driving and vehicle allocation, evaluating the individual and combined impacts of those measures.

This methodology was calibrated and validated by comparing estimates yielded by the developed numerical tools with real measurements, resulting in a deviation of 4,9% for the 19 trips measured with diesel vehicles. Eco-driving has a potential to reduce fuel consumption by 3,1%, with a trip duration increase of 0,3%. Vehicle allocation can reduce fuel consumption by 2,3% with an increase of 0,1% in trip duration. When combined, these measures provide a reduction of 5,6% in fuel consumption.

Natural gas proved to be a viable option, emitting less CO₂ (-10,4%), CO (-21,8%), NO_x (-59,5%) and PM (-97,8%) than a diesel vehicle, with HC emissions raising by 75,0%.

The adoption of these solutions has a great potential to increase fleet fuel efficiency, with the tools developed in this dissertation providing important guidance.

Keywords: heavy-duty vehicles, diesel, natural gas, eco-driving, vehicle allocation, vehicle characterization, real-world driving conditions.

Índice

1 – Introdução	1
1.1 – Enquadramento	1
1.2 – Objetivos	5
1.3 – Organização da dissertação	6
2 – Estado da arte	7
3 – Metodologia de aquisição e análise de dados	25
3.1 – Caso de estudo	25
3.2 – Metodologia de análise de dados STP	26
3.2.1 – Procedimento experimental para recolha de dados	27
3.2.2 – Metodologia de análise de dados	31
3.3 – Metodologia para estimar curvas de consumo de combustível	34
4 – Desenvolvimento de metodologias para quantificação de impactes	37
4.1 – Metodologia para a quantificação dos impactes da eco-condução	37
4.2 – Metodologia para a quantificação dos impactes da alocação de viaturas	40
4.3 – Metodologia para a quantificação dos impactes da eco-condução associada à alocação de viaturas	43
4.4 – Metodologia para a quantificação dos impactes ambientais	44
5 – Resultados e discussão	45
5.1 – Validação da ferramenta e resultados da caracterização	45
5.2 – Impactes das medidas de eficiência energética	49
5.2.1 – Aplicação de eco-condução	50
5.2.2 – Aplicação de alocação de viaturas	53
5.2.3 – Aplicação de eco-condução associada à alocação de viaturas	55
5.3 – Impacte ambiental de viaturas a Gás Natural	58
6 – Conclusões	59
7 - Trabalho futuro	61
Bibliografia	62
ANEXO A – Análise economia ao veículo a gás natural	68

Índice de tabelas

Tabela 1 - Diferentes meios de transporte de mercadorias	2
Tabela 2 - Postos de abastecimento de gás natural em Portugal	17
Tabela 3 - Exemplos de estudos relacionados com a eco-condução em veículos pesados de mercadorias	22
Tabela 4 - Viaturas caracterizadas	25
Tabela 5 - Dados utilizados para a caracterização da viatura	27
Tabela 6 - Viagens realizadas	31
Tabela 7 - Fatores para o cálculo do STP	32
Tabela 8 - Distribuição modal do STP	33
Tabela 9 - Exemplo de um conjunto de 3 viagens e os consumos estimados para 3 viaturas distintas	43
Tabela 10 - Distribuições possíveis e consumos associados para o exemplo da tabela 9	43
Tabela 11 - Fatores de emissão de CO ₂	44
Tabela 12 - Fatores de emissão de THC, CO, NO _x e PM	44
Tabela 13 - Viagens realizadas com as diferentes viaturas.....	45
Tabela 14 - Viagens realizadas com a viatura 8.....	46
Tabela 15 - Resultados da caracterização das viaturas	47
Tabela 16 - Resultados da validação	49
Tabela 17 - Resultados da implementação de medidas de eco-condução	51
Tabela 18 - Redução das emissões através da implementação de medidas de eco-condução	52
Tabela 19 - Consumos para as diferentes viaturas (sem o efeito da eco-condução).....	54
Tabela 20 - Redução das emissões através da alocação de viaturas	55
Tabela 21 - Consumos para as diferentes viaturas com aplicação de eco-condução.....	56
Tabela 22 - Redução das emissões através da implementação de medidas de eco-condução associada à alocação de viaturas	57
Tabela 23 - Variação das emissões de poluentes através do uso de viaturas a gás natural (comparado com uma viatura a gásóleo média)	58

Índice de figuras

Figura 1 - Distribuição modal do transporte de mercadorias na união europeia (%).....	1
Figura 2 - Exemplo do efeito da introdução de apêndices aerodinâmicos para a redução da resistência aerodinâmica	8
Figura 3 - Exemplo da configuração de pneus "dois a dois" usada antigamente (à esquerda) e dos novos pneus individuais de baixa resistência ao rolamento (à direita)	9
Figura 4 - Exemplo dum sistema híbrido de configuração em série	14
Figura 5 - Exemplo dum sistema híbrido de configuração em paralelo	14
Figura 6 - Exemplo dum sistema híbrido de configuração power split	15
Figura 7 - Localização dos postos de abastecimento de hidrogénio ativos na europa	16
Figura 8a - Postos de abastecimento convencionais na zona da grande lisboa	18
Figura 8b - Postos de abastecimento de gás natural para veículos em portugal	18
Figura 9 - GPSMap 76 CSX da garmin, utilizado para a recolha dos dados relativos à dinâmica e topografia	27
Figura 10 - Exemplo de uma balança para pesados da marca Cachapuz	28
Figura 11 - Exemplo da distribuição temporal do STP de uma viagem	34
Figura 12 - Exemplo da curva de consumo característica	35
Figura 13 - Perfil de velocidades de uma viagem antes e depois da eco-condução.....	39
Figura 14 - Comparação de um excerto de uma dinâmica com e sem o efeito da eco-condução	39
Figura 15 - Comparação da distribuição de STP de uma viagem antes e após a aplicação de eco-condução	40
Figura 16 - Exemplo do ajuste da dinâmica de uma viagem baseado na potência das diferentes viaturas: 330 cv (verde), 400 cv (azul), 420 cv (vermelho) e 440 cv (preto).	42
Figura 17 - Exemplo do abastecimento da viatura a gás natural	47
Figura 18 - Curvas de consumo de todas as viaturas caracterizadas	48

Lista de abreviaturas

APU - *Auxiliary Power Units*

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

CMEM – Comprehensive Modal Emission Model

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

GNC – Gás Natural Comprimido

GNL – Gás Natural Liquefeito

GPL – Gás Petrolífero Liquefeito

GPS – *Global Positioning System*

HBEFA – Handbook Emission Factors for Road Transport

MOVES – Motor Vehicle Emission Simulator

NO_x – Óxidos de azoto

OBD – *On-Board Diagnostic*

PHEM – Passenger Car and Heavy Duty Emission Model

PM – *Particulate Matter*

STP – *Scaled Tractive Power*

THC – *Total Hydrocarbon*

VSP – *Vehicle Specific Power*

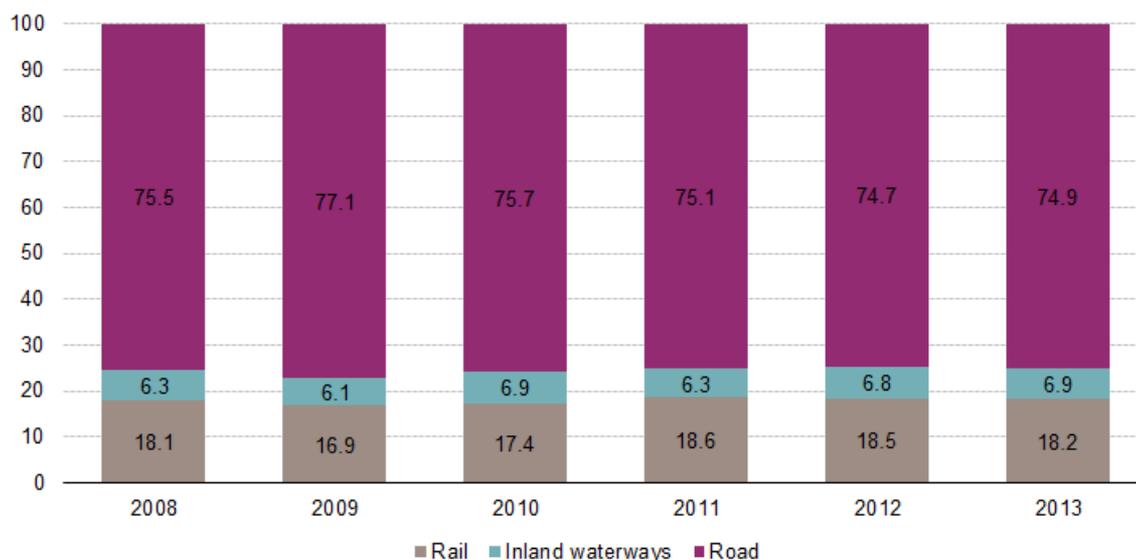
ZEV – *Zero Emission Vehicle*

1 – Introdução

1.1 – Enquadramento

Atualmente é consensual que a atividade humana, em particular atividades que envolvam a queima de combustíveis fósseis, estão diretamente associadas à emissão de poluentes. Alguns destes poluentes têm efeitos essencialmente globais, denominados gases de efeito de estufa, que levam a alterações climáticas, nomeadamente o aquecimento global; outros apresentam um impacto predominantemente local, afetando diretamente a qualidade do ar que respiramos [1]. Um dos principais setores responsáveis pela queima de combustíveis fósseis e consequente emissão de poluentes é o setor dos transportes. Segundo a EEA [2], em 2012 este setor foi responsável por 19,6% das emissões de gases de efeito de estufa na União Europeia.

O transporte rodoviário de mercadorias apresenta-se como o principal meio de transporte de mercadorias quer a nível nacional como internacional, sendo que na União Europeia, este meio é responsável por cerca de ¾ de todas as mercadorias transportadas (Figura 1).



(*) EU aggregates contain estimated data for rail for 2012-2013 (BE, LU), inland waterways for 2008 (BG,RO) and exclude road freight transport for MT (negligible).

Figura 1 - Distribuição modal do transporte de mercadorias na União Europeia (%) [3]

Só em Portugal, no ano de 2014, foram registados 3698 novos veículos pesados de mercadorias (>16 toneladas), um aumento de 22,0% face ao ano anterior [4].

As principais alternativas ao transporte pesado de mercadorias são os transportes ferroviário, aéreo e fluvial. A Tabela 1 apresenta, de forma resumida, as vantagens e desvantagens de cada um dos modos possíveis para o transporte de mercadorias.

Tabela 1 - Diferentes meios de transporte de mercadorias

Modo de transporte	Vantagens	Desvantagens
Aéreo	<ul style="list-style-type: none"> Elevada velocidade no transporte em longas distâncias 	<ul style="list-style-type: none"> Elevado custo Reduzida capacidade
Marítimo/Fluvial	<ul style="list-style-type: none"> Elevada capacidade Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> Baixa velocidade Fortemente dependente da existência de linhas de água Possibilidade de ser necessária a utilização de outros meios de transporte para completar a entrega
Ferrovário	<ul style="list-style-type: none"> Rapidez Elevada capacidade Elevada eficiência global (consumo de energia por unidade de carga transportada) 	<ul style="list-style-type: none"> Fortemente dependente da existência de linhas ferroviárias Possibilidade de ser necessária a utilização de outros meios de transporte para completar a entrega
Rodoviário	<ul style="list-style-type: none"> Grande rede de infraestruturas Capacidade de entregar a carga diretamente no destino 	<ul style="list-style-type: none"> Reduzida capacidade por veículo Aumento do tráfego rodoviário

O transporte de mercadorias por meio terrestre, consegue cobrir uma área muito elevada graças à extensa cobertura da infraestrutura rodoviária existente e ao maior alcance que esta proporciona, conseguindo fornecer um serviço mais direto, em que as mercadorias são entregues no destino final. Por sua vez, outros modos de transporte necessitam normalmente de ser complementados (muitas das vezes por veículos rodoviários pesados de mercadorias) para transporte até ao destino. Por este motivo o transporte de mercadorias através dos veículos pesados apresenta atualmente uma extrema importância na nossa economia, justificando ainda mais a necessidade de abordar o problema dos consumos e emissões produzidos por este tipo de veículos.

Assim sendo, tem existido uma preocupação crescente em minimizar os impactos energéticos e ambientais desta atividade para garantir a sustentabilidade e qualidade de vida das gerações futuras, mas também com vista à redução dos custos operacionais das frotas através da redução dos gastos em combustíveis e conseqüente aumento da competitividade das empresas.

Uma das formas de reduzir os impactos energéticos e ambientais é através da promoção da eficiência energética que levará a uma redução do consumo de combustível. Uma das medidas de eficiência energética mais utilizadas no sector dos transportes é a eco-condução, que incentiva os condutores a praticar uma condução suave e económica, com acelerações suaves, velocidades moderadas, uso mais eficiente da topografia, entre outros comportamentos [5].

Nos pesados de mercadorias estas medidas já provaram ser capazes de levar a reduções de consumo em ambiente real, levando a reduções entre 2,6% [6] a 20% [7], valores que dependem de diversos fatores, como o tipo de formação e contexto do estudo, mas que servem para comprovar o potencial da eco-condução como medida de eficiência energética.

A adoção de políticas de racionalização energética de frota e de eco-condução permitem igualmente a redução dos consumos sem que haja necessidade de investimentos avultados, sendo por isso ideais para a redução dos custos operacionais das empresas, sem que haja necessidade de renovação da frota. Para além da eco-condução, a redistribuição das viaturas pelos serviços a prestar também pode contribuir para um aumento da eficiência energética dado que é possível que, dadas as suas características, haja viaturas que sejam mais adequadas a um determinado tipo de serviço do que outras [5], pelo que uma correta alocação pode levar a uma redução dos consumos globais da frota.

Esta redução de consumo traduz-se numa redução das despesas em combustível, o que se apresenta como um grande fator de incentivo para as empresas (e pessoas particulares) adotarem medidas de aumento da eficiência energética.

Outra forma de reduzir o consumo de combustível e emissões poluentes é através do desenvolvimento de novas tecnologias, mais limpas e eficientes. Em particular, no setor dos transportes, as normas EURO, que regulam os limites de poluentes que os veículos podem emitir, têm vindo a ser cada vez mais exigentes [8], reduzindo os valores máximos permitidos a cada iteração e levando os construtores a desenvolver veículos cada vez menos poluentes. Desde que foi implementada a primeira norma EURO, as emissões máximas permitidas de CO foram reduzidas em 67%, as de HC foram reduzidas em 88,2%, as de NO_x em 95% e as partículas em 98,4% [8]. Contudo, apesar dos veículos novos serem mais eficientes e menos poluentes que os antigos, a sua substituição como forma de reduzir consumos e emissões não é algo que seja praticado frequentemente, pois a aquisição de viaturas novas tipicamente requer um grande investimento. Assim, esse investimento é apenas feito quando as viaturas antigas precisam de substituição, pois a redução dos custos operacionais resultantes da aquisição de um veículo novo não consegue compensar o elevado custo de aquisição dessa mesma viatura. De um ponto de vista económico e tendo em conta todos os custos associados ao uso de um pesado de mercadorias (consumo de combustível e de AdBlue e custos de manutenção) foi estimado que apenas compensa substituir uma viatura antiga após um certo período de tempo, que é de 72 meses (1600000 km) para uma viatura norte-americana [9].

Ainda relativamente à substituição de viaturas, a substituição de veículos a gasóleo por viaturas que utilizem outro tipo de combustível alternativo apresenta-se como uma solução para reduzir gastos com consumos e emissão de poluentes. Nos veículos pesados de mercadorias isto significa a substituição das viaturas a gasóleo por viaturas movidas a gás petrolífero liquefeito (GPL) [10] ou a gás natural liquefeito (GNL) [11]. Esta última é uma tecnologia bastante recente, mas promete uma redução dos gastos em combustível através do

uso de um combustível mais barato [11] bem como uma redução das emissões poluentes face a uma viatura típica a gasóleo [11, 12] conseguindo uma redução das emissões de gases de efeito de estufa de 20% [13].

Neste contexto, de forma a poder abordar o problema da redução do consumo de energia e emissões de veículos pesados de mercadorias em ambiente real de funcionamento, foi realizado um estágio na empresa de transportes de mercadorias Transportes Paulo Duarte, no âmbito do projeto Galp202020 que é resultado da parceria entre o Instituto Superior Técnico e a GALP ENERGIA e é nos dados recolhidos durante a realização desse estágio que se baseia esta dissertação.

1.2 – Objetivos

Como verificado anteriormente, a implementação de medidas de eficiência energética como a eco-condução, a alocação de viaturas ou mudança de tecnologia podem ser alternativas interessantes para a redução do consumo de combustível no setor rodoviário de mercadorias.

Nesse sentido, os objetivos desta dissertação foram a avaliação energética e ambiental da implementação das seguintes políticas de eficiência energética:

- Medidas de eco-condução
- Alocação de viaturas
- Uso de veículos movidos a Gás Natural Liquefeito

Para cumprir estes objetivos foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Monitorização experimental para a recolha de dados reais de condução de acordo os objetivos e condicionantes da empresa;
- Desenvolvimento de uma metodologia para a análise dos dados recolhidos e caracterização das viaturas;
- Desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação do impacte das diferentes medidas definidas para análise (eco-condução, alocação de viaturas e uso de veículos movidos a GNL); e
- Estudo do impacte energético e ambiental da implementação das medidas de eco-condução e racionalização da frota e da utilização de viaturas movidas a gás natural.

O desenvolvimento do trabalho levou ao desenvolvimento de métricas de apoio para os responsáveis da empresa na tomada de decisões através da antecipação dos potenciais resultados (em termos de consumo de energia e emissões) que as suas decisões irão ter. Por exemplo, permitindo auxiliar na decisão de quais as viaturas a adquirir tendo em conta o serviço no qual vão ser utilizadas; quais os impactes da introdução de medidas de eco-condução (p. ex^o, limitação da velocidade máxima); quais os impactes da alocação cuidada das viaturas a utilizar em cada serviço e qual o impacte da aquisição de viaturas movidas a GNL.

1.3 – Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos distintos.

Em primeiro lugar no capítulo “1 – Introdução” é feito um enquadramento do tema da dissertação, explicando a sua importância no contexto atual. São ainda indicados os objetivos que se pretendem atingir.

No capítulo “2 – Estado da arte” é apresentado o panorama do conhecimento e tecnologias atuais, nomeadamente tecnologias utilizadas para a redução dos consumos e emissões em veículos deste tipo e métodos de análise dos mesmos e resultados obtidos em estudos similares.

No capítulo “3 – Metodologia” é apresentado o caso de estudo e é descrito o procedimento experimental desenvolvido para a recolha e processamento dos dados necessários para a realização desta dissertação. É apresentada ainda a metodologia de base usada para a caracterização das viaturas em estudo.

No capítulo “4 – Metodologia para a quantificação de impactes” é apresentada a metodologia desenvolvida para o estudo dos impactes das medidas de eficiência energética, nomeadamente a eco-condução, alocação de viaturas e o efeito combinado das duas.

No capítulo “5 – Resultados e discussão” são apresentados os resultados obtidos para a validação da metodologia desenvolvida, bem como os resultados da caracterização das viaturas e estimativas para os impactes das medidas de eficiência energética.

No capítulo “6 – Conclusões” são apresentadas as conclusões resultantes da realização desta dissertação, nomeadamente acerca do potencial de redução de consumos e emissões através da formação dos condutores em eco-condução, da melhor gestão da frota da empresa através da alocação de viaturas e da possibilidade do investimento em viaturas movidas a gás natural.

No capítulo “7 – Trabalho futuro” é apresentada uma discussão relativa ao trabalho desenvolvido, indicando os passos que devem ser tomados de seguida para aprofundar o conhecimento resultante e aplicação do mesmo em termos práticos.

2 – Estado da arte

A crescente preocupação com os impactos energéticos e ambientais causados pela atividade humana [14] e o aumento do preço dos combustíveis [15] levaram à adoção de um conjunto de medidas tendo em vista a redução do consumo de combustíveis e emissões de poluentes associadas à queima dos mesmos.

No setor rodoviário isto significa desenvolver veículos novos cada vez mais eficientes, diminuindo os consumos e minimizando o impacto energético, mas mantendo o desempenho necessário. Este aumento de eficiência pode ser atingido de diversas maneiras, como por exemplo através do aumento da eficiência dos motores e cadeias motrizes tipicamente utilizados, aumentando a eficiência do processo de combustão e minimizando atritos internos ou através da inclusão de ferramentas de ajuda à condução, permitindo aos condutores melhorarem os seus hábitos de condução.

Outra forma de minimizar os impactos energéticos pode ter origem na introdução de novas tecnologias, como os veículos movidos a gás natural que estão atualmente a ser introduzidos no mercado ou com a utilização de veículos com propulsão híbrida ou até 100% elétrica. Esta adoção deverá ser feita sempre tendo em consideração o âmbito de utilização dos veículos.

O setor dos transportes de mercadorias, sendo responsável por um elevado consumo de energia e emissões de poluentes [2, 16], é particularmente importante neste aspeto. Além disso, pelas especificidades que apresenta, quer a nível da tipologia dos veículos quer pela especificidade dos tipos de serviços que realiza, este é um sector com enormes desafios nesta área.

Desta forma, são apresentadas de seguida as diferentes alternativas para reduzir os impactos energéticos e ambientais deste sector, identificando quais os progressos que têm sido feitos, quer em termos de design de viaturas mais eficientes, quer em termos de gestão de frotas e estudo desde tipo de viaturas.

Alternativas para a redução do impacto energético e ambiental

Há duas formas distintas de reduzir o consumo realizado por este tipo de viaturas:

- Implementação de modificações à tecnologia usada nos veículos, de forma a desenvolver veículos mais eficientes e ecológicos [17]; e
- Gestão mais inteligente de frotas de pesados atualmente disponíveis, através de:
 - alterações ao comportamento dos condutores (com a introdução de formação em eco-condução) [18];
 - processo de seleção de veículos mais eficiente (alocação de viaturas a serviços baseado nas suas características) [5].

Assim, do ponto de vista da promoção de melhorias ao desempenho dos veículos, há vários pontos que podem ser abordados:

Resistência aerodinâmica

A instalação de apêndices aerodinâmicos, de forma a tornar os veículos mais eficientes na forma como atravessam o ar, é uma das medidas mais conhecidas e mais utilizadas atualmente. Estas modificações aos veículos tornam-se particularmente importantes quando se tem em conta que as perdas devidas ao arrasto aerodinâmico podem atingir valores na ordem dos 22% do combustível utilizado [17]. A introdução de apêndices aerodinâmicos que se estendem da cabine até ao semi-reboque (Figura 2) pode levar a uma redução do arrasto aerodinâmico de 25,5% (para ângulos de *yaw* compreendidos entre os 0° e os 15°). A introdução de saias laterais no reboque em conjunto com o apêndice que liga o reboque à cabine pode levar a uma redução máxima do arrasto aerodinâmico de 26,1% [19].



Figura 2 - Exemplo do efeito da introdução de apêndices aerodinâmicos para a redução da resistência aerodinâmica [20]

Outra forma de reduzir as perdas devidas ao arrasto aerodinâmico é a utilização de veículos em *tandem*, em que dois ou mais veículos seguem em fila, a uma curta distância entre si, de forma a minimizar o arrasto sofrido pelos veículos que circulam atrás. Estudos indicam que para dois veículos que se encontram a circular a 70 milhas por hora (113 km/h) a uma distância de 1,5 m entre si, é possível obter uma redução de consumo de 15 a 20% no veículo que segue o da frente [21]. No entanto, este método acarreta os seus riscos, dado que a reduzida distância entre os veículos aumenta o potencial de acidente em caso de uma travagem mais brusca do veículo da frente. Assim, este método tem sido testado apenas em autoestrada com veículos conectados entre si, que comunicam constantemente para em caso de necessidade de efetuar uma travagem brusca, todos os veículos do comboio sejam informados de forma instantânea de forma a procederem a uma travagem simultânea evitando colisões com os veículos da frente.

Resistência ao rolamento

Outra forma de reduzir o consumo de combustível é através da redução da resistência ao rolamento causado pelos pneus, que são responsáveis por cerca de 13% das perdas energéticas dos veículos [17]. Assim, a substituição dos típicos pneus em configuração “dois a dois” por um só pneu mais largo, mas mais estreito que os dois somados (Figura 3), permite suportar as mesmas cargas aplicadas com uma redução da resistência ao rolamento na ordem dos 10% [22]. Além disso, esta nova configuração de pneus ainda permite reduzir o peso em cerca de 340 kg para um conjunto “camião + semi-reboque” típico, face à configuração “dois a dois” [17].



Figura 3 - Exemplo da configuração de pneus "dois a dois" usada antigamente (à esquerda) e dos novos pneus individuais de baixa resistência ao rolamento (à direita) [23]

A introdução de pneus de baixa resistência ao rolamento recentemente desenvolvidos, permitem uma redução adicional dos consumos que pode atingir 6%, no caso de um veículo completamente carregado (40 toneladas) [17].

Manutenção

Do ponto de vista da manutenção, a verificação regular da pressão dos pneus, de forma a garantir que se encontram na pressão ideal de funcionamento ajuda a manter uma baixa resistência ao rolamento, dado que uma perda de 20% da pressão leva a um aumento da resistência ao rolamento na ordem dos 5 a 8%, o que se traduz num aumento dos consumos na ordem dos 2 a 3%.

Um bom alinhamento das rodas também é importante, quer para evitar desgaste prematuro dos pneus, quer pelo facto de um mau alinhamento levar a um aumento do consumo de

combustível. Isto acontece uma vez que, como podemos verificar pela equação 1 [24], o coeficiente de resistência ao rolamento é proporcional ao quadrado do ângulo de escorregamento (ângulo entre a direção para a qual as rodas apontam e a direção real para a qual as rodas se deslocam).

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

Em que F_R é a resistência ao rolamento, F_{R_0} é a resistência ao rolamento base do pneu, C_α é a rigidez do pneu e α é o ângulo de escorregamento.

Peso

O uso de materiais mais leves tem impactes positivos na redução de consumos uma vez que reduz a força necessária para vencer a resistência ao rolamento e diminui a massa que se transporta, exigindo menos potência durante acelerações e subidas mais acentuadas. Como exemplo, tem-se a substituição de metais por alumínio ou materiais compósitos [25]. Estima-se que uma redução de 1000 libras, (aproximadamente 450 kg) pode levar a uma redução dos consumos na ordem dos 0,1% em percursos em descida, 0,7-1,0% em piso plano e de 1,2-1,5% em percursos em subida [17].

Tempo ao *ralenti*

Tendo em conta que, dependendo dos casos, o *ralenti* pode representar até cerca de 20 a 40% do tempo que um motor está ligado [26, 27], a redução dos tempos de *ralenti* apresenta-se como uma forma simples de baixar os consumos.

No entanto, nos veículos pesados de mercadorias onde os condutores passam várias horas por dia ou até mesmo dias inteiros a operar, desligar o motor para baixar consumos pode não ser uma opção, dado que a cabine precisa de uma fonte de energia de forma a permitir o funcionamento de diversos equipamentos como aquecedor e ar condicionado, compartimentos frigoríficos, micro-ondas ou televisões e *routers*.

Assim, uma forma de permitir o uso destes equipamentos e simultaneamente poder desligar o motor durante os períodos de tempo prolongados quando não se está em viagem é a introdução de APU's (*Auxiliary Power Units*). Este tipo de equipamentos armazena e/ou gera energia elétrica que é usada para alimentar os equipamentos periféricos quando o veículo se encontra parado e o motor desligado. Os benefícios vão para além da redução dos consumos e consequentes emissões, que podem ser de 6 a 29% [26], uma vez que reduzindo o tempo de funcionamento de motor se minimiza o desgaste que o mesmo sofre, aumentando assim o seu tempo útil de vida.

Quando se está em viagem os períodos de tempo ao *ralenti* são mais curtos (durante paragens em sinais vermelhos ou de STOP, quando se espera para entrar em rotundas ou cruzamentos, etc.) e nestes casos o potencial de redução dos tempos de *ralenti* são menores. No entanto,

com a introdução de sistemas “Stop/Start”, que detetam quando o veículo está parado e desligam o motor até este voltar a ser necessário, é possível reduzir o tempo que o motor está em funcionamento e assim conseguir uma redução dos consumos em viagem na ordem dos 3% [17].

Cruise control

O uso de sistemas de *cruise control* pode também ajudar a baixar consumos através de pequenas alterações à forma como a velocidade e acelerações do veículo são geridas. O *cruise control* adaptativo alia um sistema de *cruise control* convencional a um sistema de radar ou laser montado na frente do veículo que lê o tráfego em tempo real e ajusta a condução do veículo da maneira apropriada, por exemplo, cortando momentaneamente o acelerador ao camião quando é detetado um veículo que circula à frente do camião a uma velocidade mais baixa, reduzindo assim o tempo passado em aceleração bem como a necessidade de travar. Isto leva a uma redução dos consumos graças ao menor uso do acelerador, bem como a um aumento da segurança através da redução automática da velocidade quando se encontra um veículo em marcha lenta pelo caminho. Além disso, estudos indicam que o uso deste sistema de *cruise control* pode levar a uma redução do congestionamento no tráfego [28].

Um sistema ainda mais avançado é o *cruise control* preditivo que adiciona um sistema GPS e funciona em conjunto com o *cruise control* base. Este sistema é particularmente útil em terrenos com bastantes variações de elevação uma vez que o veículo sabe quando é que se aproximam subidas mais íngremes e assim aproveita para ganhar momento antes do início da subida e durante a subida perde velocidade de forma gradual de forma a minimizar a potência exigida ao motor e assim reduzir o consumo de combustível. Este sistema é particularmente útil quando o veículo se encontra mais pesado, situação em que pode levar a uma redução dos consumos de cerca de 5% [29].

Os sistemas de *cruise control* mais evoluídos contam ainda com a informação do trânsito em tempo real, de forma a informar o veículo sobre o tipo de condução mais eficiente tendo em conta aquilo que o espera mais à frente. No caso de perturbações ao tráfego no percurso inicialmente planeado estes sistemas seguem uma de duas opções: ou desviam o veículo caso seja possível encontrar outro percurso mais eficiente de um ponto de vista energético ou reduzem a velocidade a que o veículo circula de forma a aumentar o tempo passado até encontrar essa perturbação e assim diminuir o tempo perdido em trânsito lento ou parado. Deste modo, este sistema mostra-se particularmente útil em condução urbana, onde estudos indicam que é possível obter reduções de consumo que variam entre 5 a 7% com uma variação da duração do tempo de viagem inferior a 3% [30].

Planeamento do percurso

Um bom planeamento do percurso também pode contribuir para menores gastos em combustível, uma vez que normalmente há mais que um caminho possível e haverá sempre um que levará a um gasto de combustível menor que os restantes. Este planeamento é feito

pelos gestores de tráfego das empresas recorrendo normalmente a *software* desenhado para o efeito. Este sistema apresenta melhores resultados para frotas de veículos ligeiros onde se podem ter reduções na ordem dos 5 a 10% [31]. No caso de veículos pesados de mercadorias a redução do consumo de combustível é de apenas 1% [32]. Uma mudança horária da realização dos percursos, de forma a evitar trânsito lento durante as horas de ponta também pode levar a uma condução mais económica através da redução do tempo gasto em ralenti bem como da redução da necessidade de travagem e consequentes acelerações.

Hibridização dos veículos

Os veículos híbridos são uma tecnologia já com alguns anos, bastante conhecida e cada vez mais utilizada nos veículos ligeiros, mas nos veículos pesados de mercadorias ainda não há opções à venda que as transportadoras possam usar. Estes sistemas são assim chamados por combinar dois sistemas de propulsão distintos que trabalham em conjunto para mover o veículo. Nos veículos pesados estes sistemas aliam normalmente um motor elétrico ao motor de combustão interna, mas é possível ter sistemas que usam uma transmissão hidráulica que usa fluido pressurizado para produzir um binário que complementa o motor de combustão [17]. Nos pesados esta é uma opção que está a começar a ser estudada uma vez que estes sistemas já provaram ser eficazes a reduzir os consumos noutras tipologias de veículos, como os pesados de transporte coletivo de passageiros [33] onde as poupanças em combustível podem chegar aos 50% [34], pelo que é possível que a hibridização dos veículos possa levar à redução de consumos e emissões dos veículos pesados de mercadorias. Estudos indicam um potencial de redução dos consumos em pesados de mercadorias de 20% [35] ou mais, mesmo quando se tem em consideração o aumento de peso, como indica o estudo da Volvo, que estima uma redução de 10 a 38% dos consumos mesmo considerando que a tecnologia híbrida, em particular as baterias, levam a um aumento do peso do veículo de 3000 kg [36]. Os sistemas híbridos têm algumas características próprias que os distinguem dos sistemas convencionais e que contribuem para menores gastos, bem como para melhor uma condução do veículo [17]:

- **Mais binário e maior disponibilidade do mesmo.** Os motores elétricos apresentam mais binário a menores rotações que os motores de combustão, sendo particularmente indicados para arranques e recuperações a baixa velocidade.
- **Travagem regenerativa.** O travão regenerativo é um equipamento que abranda o veículo e converte alguma da energia cinética numa forma de energia que é possível de ser recuperada e armazenada para ser usada mais tarde (em baterias ou condensadores, reservatórios de fluido pressurizado ou volantes de inércia). A aplicação destes sistemas faz ainda mais sentido quando se tem em consideração a massa destes veículos (até 40 toneladas ou mais em casos especiais) o que contribui para uma grande quantidade de energia cinética possível de ser recuperada.

- **Maior eficiência.** O motor elétrico apresenta uma eficiência bastante superior a qualquer motor de combustão, o que significa menores perdas e conseqüentemente menores consumos [37].
- **Menores emissões poluentes locais.** O sistema híbrido alivia a carga que se aplica no motor de combustão, podendo até funcionar com este desligado, levando assim a um menor consumo de combustível e a uma menor emissão de poluentes locais que, em condução citadina em ambiente real de condução, pode ser de 10 a 38% [38];
- **Possibilidade de *downsizing* do motor.** Ao aliviar a carga a que se sujeita o motor de combustão interna, torna-se possível usar motores de combustão interna mais pequenos, o que pode levar a um menor peso da cadeia motriz e a uma redução dos consumos, uma vez que ao usar um motor de combustão interna mais pequeno, este passará a funcionar mais tempo em cargas altas, onde a eficiência é maior [38];
- **Melhor *design* dos motores.** Ao usar cadeias motrizes híbridas com configuração em série (explicado de forma sucinta mais à frente), em que o motor funciona como gerador, é possível desenhar um motor que funcione constantemente numa situação de eficiência máxima, melhorando assim a eficiência geral da cadeia motriz do veículo [39].
- **Possibilidade de redução do tempo ao *ralenti*.** Ao ter sistemas híbridos com baterias torna-se possível desligar o motor durante longos períodos de tempo uma vez que estas baterias têm uma capacidade muito maior que a bateria tipicamente usada num veículo convencional. Estas baterias dos veículos híbridos funcionam como uma APU, permitindo o uso de equipamentos elétricos no interior da cabine sem necessidade de manter o motor de combustão ligado ao *ralenti* de forma a funcionar como fonte de energia.
- **Melhor resposta ao acelerador.** Os motores elétricos têm uma resposta mais rápida que os motores de combustão no que diz respeito a solicitações por parte do condutor, o que melhora o comportamento do veículo em estrada.
- **Melhor robustez.** Em configurações híbridas em paralelo (explicadas sucintamente mais à frente) o veículo pode funcionar apenas com um motor no caso de o outro falhar. No caso de avaria no motor de combustão o motor elétrico pode funcionar sozinho e permitir que o veículo continue em funcionamento ou vice-versa [17].
- **Híbridos elétricos *plug-in*.** Os sistemas *plug-in* podem ser usados para carregar o veículo durante as horas de vazio, baixando custos por parte das transportadoras e contribuindo para uma melhor distribuição diária das necessidades elétricas da rede nacional.

No entanto, estes tipos de sistemas apresentam algumas desvantagens. A hibridização leva a uma maior complexidade dos veículos, o que pode levar a maiores custos, quer de aquisição, quer de manutenção. A maior complexidade pode levar ainda a uma redução da fiabilidade e a instalação destes sistemas pode causar um aumento do peso, que está normalmente associado a um aumento dos consumos [17].

Os híbridos com sistema hidráulico usam um fluido de trabalho, que é pressurizado durante a travagem regenerativa através duma bomba hidráulica e reservado num reservatório próprio a

alta pressão. Quando necessário, o fluido é enviado para a bomba que agora funciona como motor hidráulico, fornecendo um binário que complementa o motor de combustão.

Os híbridos elétricos usam eletricidade que é gerada durante a travagem regenerativa, pelo motor de combustão interna ou carregada através da rede no caso dos híbridos plug-in. Essa eletricidade é então armazenada até ser necessária, sendo enviada para o motor elétrico como forma de auxiliar o motor de combustão.

Estes sistemas podem ser desenhados em configurações diferentes, havendo sistemas em série (Figura 4) ou em paralelo (Figura 5). Nos sistemas em série, o motor de combustão fornece energia diretamente ao motor elétrico servindo como gerador, enquanto nos sistemas em paralelo tanto o motor de combustão como o motor elétrico/hidráulico são responsáveis pela propulsão do veículo, trabalhando em conjunto e dividindo a carga aplicada entre si.

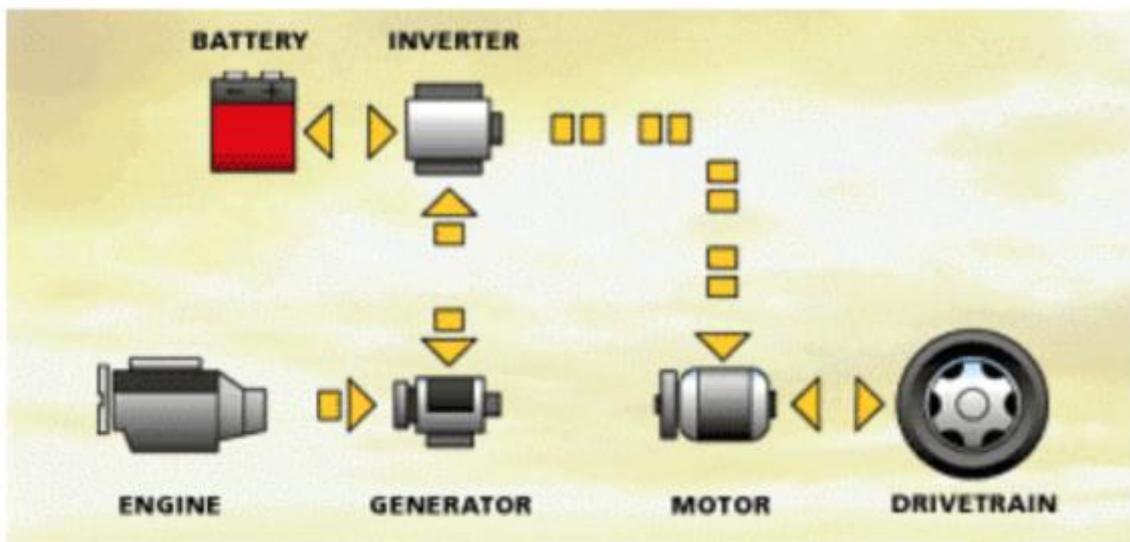


Figura 4 - Exemplo dum sistema híbrido de configuração em série [38]

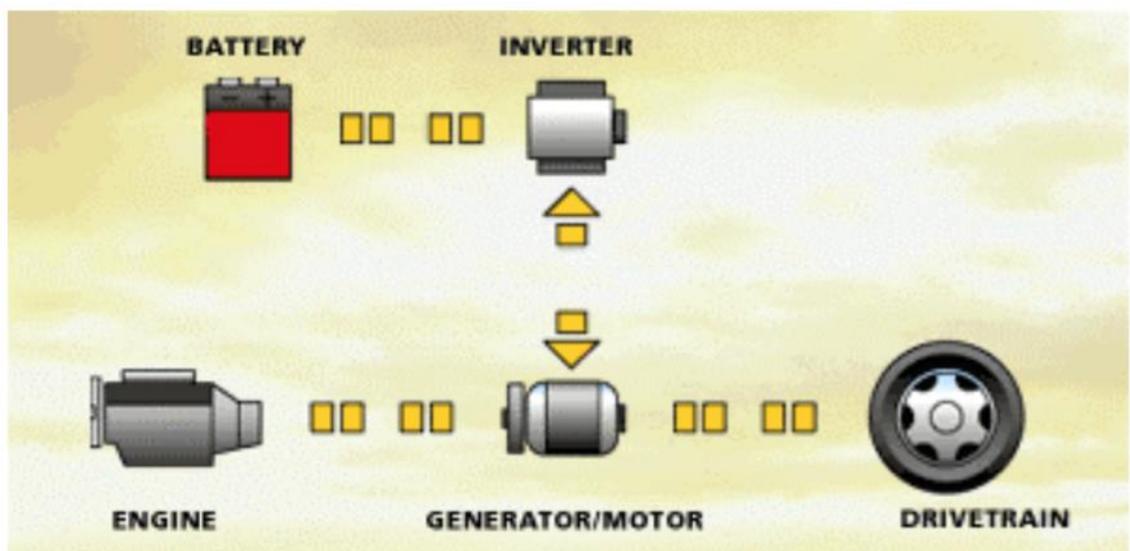


Figura 5 - Exemplo dum sistema híbrido de configuração em paralelo [38]

Os sistemas *power-split* (Figura 6) combinam as tecnologias indicadas acima, tendo um motor de combustão que funciona como gerador, mas que também está mecanicamente conectado às rodas podendo funcionar diretamente como forma de propulsão do veículo.

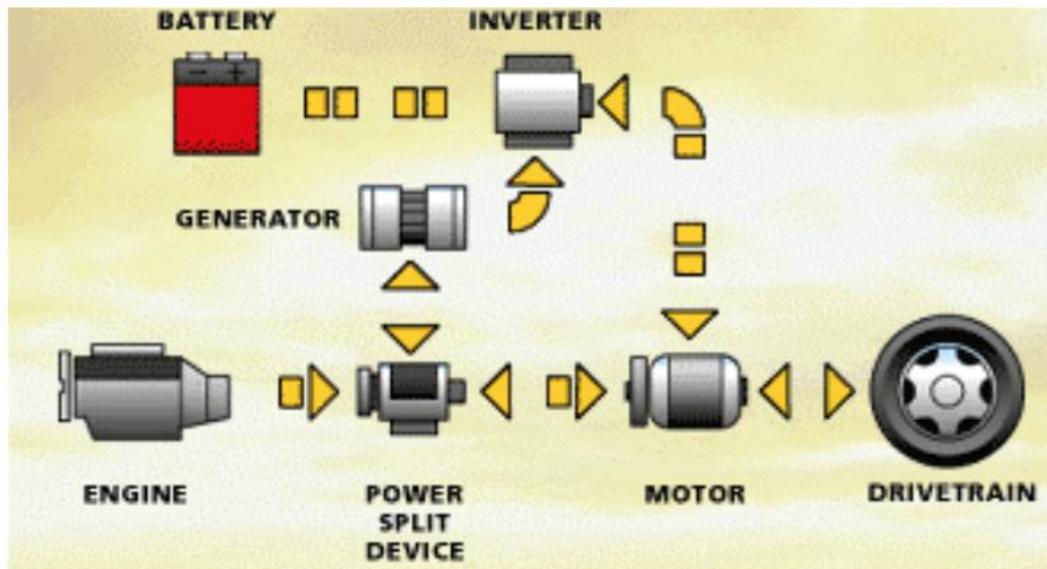


Figura 6 - Exemplo dum sistema híbrido de configuração Power Split [38]

Os benefícios estimados que se podem obter com a hibridização dos veículos pesados de mercadorias são de cerca de 5 a 9% de redução de consumos quando se analisa o veículo durante a circulação em estrada e de 5 a 8% quando se analisa a possibilidade de redução do tempo em ralenti graças à possibilidade de usar as baterias como APU's [17].

Outra opção é a introdução de veículos 100% elétricos, ou Zero Emission Vehicles (ZEV) como são frequentemente chamados, em que o veículo deixa de ter motor de combustão interna, tendo como única fonte de propulsão um motor (ou conjunto de motores) elétrico. O sistema mais típico para este sistema de propulsão é através do uso de baterias. Neste caso a tecnologia precisa de amadurecer, uma vez que os veículos de transporte de mercadorias percorrem várias centenas de quilómetros diários precisando assim de um sistema com grande autonomia e a tecnologia atual das baterias ainda não permite a criação de um conjunto suficientemente compacto e leve de forma a ser uma opção viável com a autonomia requerida a este tipo de aplicação [40].

Outra opção seria a troca de baterias, em que os veículos param ao longo da viagem para trocar de baterias e assim aumentar a sua autonomia, de forma análoga a um abastecimento de gasóleo numa bomba de combustível.

No entanto, esta é uma opção que não agrada aos construtores, dada a complexidade da mesma, quer devido do elevado peso do sistema de baterias que dificulta o processo, quer devido aos perigos associados aos sistemas elétricos deste tipo [40].

Outra configuração de veículos elétricos aparece sob a forma de veículos com células de hidrogénio, em que os motores elétricos funcionam com a energia elétrica fornecida por este tipo de equipamento. Este sistema combina a eficiência dum veículo 100% elétrico com a conveniência dum veículo com motor de combustão interna, dada a possibilidade de parar para

o abastecer em apenas alguns minutos. No entanto, esta tecnologia está apenas agora a ser introduzida, pelo que o número de locais onde é possível proceder ao abastecimento dos tanques de hidrogénio (Figura 7) é muito reduzido, limitando os locais e rotas que se podem realizar com este tipo de veículos.



Figura 7 - Localização dos postos de abastecimento de hidrogénio ativos na Europa [41]

Esta tecnologia tem uma eficiência muito superior aos veículos convencionais a gasóleo, que podem chegar aos 50-60% [42] enquanto os veículos a gasóleo apresentam eficiências que podem chegar aos 37% [43].

No entanto, para estes sistemas poderem funcionar devidamente é necessário o uso de baterias [44] de forma a armazenar energia para alturas de maior aceleração ou para armazenar energia recuperada durante a travagem regenerativa.

Além disso, para armazenar hidrogénio suficiente para aplicações de longo curso, o volume ocupado pelo depósito é cerca de 8,5 vezes superior ao volume ocupado pelo depósito de gasóleo [45] e a durabilidade dos sistemas atuais é de cerca de 10000 horas, ficando aquém das cerca de 14500 horas exigidas a um veículo pesado de longo curso [44, 46] pelo que a aplicação deste sistema a veículos de longo curso é impraticável, dado o estado da tecnologia atualmente disponível.

Combustíveis alternativos

Dado que os sistemas com propulsão elétrica, ainda que promissores, precisam de algum tempo para se tornarem uma realidade, tecnologias mais convencionais e amadurecidas como os sistemas a gás apresentam-se como uma alternativa mais viável face o panorama atual.

Nestes sistemas, um de três combustíveis pode ser usado: o primeiro sistema usa GPL como combustível, uma tecnologia já amadurecida, com provas dadas e com uma boa rede de distribuição a nível nacional. Há duas formas de converter um motor a gasóleo para utilização

de GPL: a conversão dum motor a gasóleo para um motor *dual-fuel* que utiliza uma mistura de gasóleo e GPL; ou a conversão para um motor 100% GPL, que mantém (ou supera) o *output* do motor em funcionamento com gasóleo (tanto em binário como em potência máxima) [10], reduzindo ainda as emissões poluentes associadas, fazendo um motor EURO III cumprir as emissões típicas dum veículo EURO IV / EURO V [10].

Para estes sistemas funcionarem, é necessário proceder a algumas modificações ao motor e periféricos, bem como proceder à instalação de um novo tanque de combustível, o que requer um investimento inicial mas que apresenta um tempo de retorno inferior ao tempo de vida útil da viatura [10].

Outros sistemas usam gás natural como combustível, seja na sua forma comprimida (GNC) em que o gás é comprimido até 1% do seu volume original ou liquefeita (GNL), em que o gás natural é arrefecido até se atingir a sua fase líquida [11].

Para veículos pesados de mercadorias até 40 toneladas ou veículos que percorram mais de 400 km diariamente, os sistemas GNL apresentam-se como sendo mais adequados, permitindo maior autonomia que os sistemas a GNC. Por outro lado, os sistemas GNC, dada a sua menor complexidade e requerimentos em termos de espaço necessário, são mais adequados a veículos ligeiros, a veículos pesados com menos de 12 toneladas ou veículos que percorram menos de 400 km diários [47].

Esta tecnologia já se encontra disponível para as transportadoras adquirirem, no entanto é fortemente penalizada pela reduzida disponibilidade de GNL, apresentada na Tabela 2:

Tabela 2 - Postos de abastecimento de gás natural em Portugal [48, 49]

Local	Empresa	Completo	GNC	GNL
Carregado	Goldenergy / Dourogás	✓	✓	✓
Loures	Goldenergy / Dourogás	✓	✓	✗
Mirandela	Goldenergy / Dourogás	✓	✓	✓
Gaia Sul – Picoto	Goldenergy / Dourogás	✓	✓	✓
Vila Real	Goldenergy / Dourogás	✓	✓	✗
Elvas – Caia	Goldenergy / Dourogás	✓	✓	✓
Matosinhos – Porto	Galp	✓	✓	✓
Sines	Galp	✗	✓	✓
Azambuja	Galp	✗	✓	✓

Como se pode verificar, em Portugal ainda há uma rede de abastecimento de gás natural para veículos muito reduzida, o que se pode verificar através da comparação das Figura 8.



Figura 8a - Postos de abastecimento convencionais na zona da Grande Lisboa [50]



Figura 8b - Postos de abastecimento de gás natural para veículos em Portugal [51]

Como se pode verificar, o número de postos de abastecimento de combustíveis convencionais em Portugal excede em muito o número de postos de abastecimento de gás natural, com a zona da Grande Lisboa, correspondente a apenas uma pequena parte do território nacional, a apresentar um número de postos de combustíveis convencionais que excede largamente o número total de postos de gás natural a nível nacional.

A reduzida disponibilidade do combustível, quando combinada com o facto de esta tecnologia ser muito recente e, por enquanto, ainda apresentar um custo por viatura que excede de forma significativa o preço de uma viatura a gasóleo de potência superior [11], justifica o facto de esta tecnologia ainda não ter conseguido penetrar no mercado e apresentar-se como um combustível de referência no segmento dos transportes de mercadorias.

Eco-condução

A tipologia dos veículos e respetivas cadeias motrizes são apenas um dos fatores que influenciam o consumo de combustível e emissões.

Um dos principais fatores no consumo de qualquer tipo de veículo é a forma como é conduzido. Para o mesmo veículo, com a mesma carga, no mesmo percurso com as mesmas condições de tráfego é possível obter grandes disparidades no consumo realizado e tudo isto depende apenas do fator humano como mostram vários programas de eco-condução que têm sido implementados com sucesso nesta tipologia de veículos: em situações de treino em simulador foram obtidas reduções de consumo de 3,5% imediatamente após o treino [52], em situações

em que os condutores receberam aulas de eco-condução com componente prática num percurso fechado foram observadas melhorias de 33,6% a 40,5% [53] e em situações de condução em ambiente real foram obtidas reduções de 9,4% para condutores sujeitos a aulas em eco-condução regulares [54] e melhorias de 13,7% para condutores que receberam treino individual a bordo dum veículo equipado com sistemas de monitorização em tempo real [55]. Outro estudo no qual foi dada formação individual aos condutores, em condições reais de condução e em veículos equipados com sistemas de monitorização em tempo real, analisou a importância da implementação dum sistema de incentivos financeiros, em que os bons condutores recebem prémios baseados na sua *performance*. Neste estudo, sem incentivos financeiros, foram obtidas reduções no consumo de 2,6% para veículos equipados com cabine para o condutor dormir (em inglês: “*sleepers cab*”) e melhorias de 5,2% para veículos sem este tipo de cabine (em inglês: “*day cab*”). Quando são dados incentivos financeiros, as reduções nos consumos dos veículos “*sleepers cab*” e “*day cab*” aumentam para 5,4% e 9,9%, respetivamente [6], mostrando a importância da motivação dos condutores nos resultados obtidos.

No entanto, foi mostrado que há uma tendência a que os comportamentos aprendidos neste tipo de formação se dissipem com o passar do tempo [56], realçando assim a importância da implementação dum sistema de monitorização nos veículos como forma de avaliar a *performance* dos condutores bem como a importância da implementação dum sistema de recompensas monetárias aos condutores, baseado na quantidade de combustível que estes poupam, como forma de manter os condutores motivados e interessados.

Assim, a implementação de medidas de eco-condução tendo em vista uma condução mais ecológica e económica apresenta-se como uma das principais formas de minimizar os impactos energéticos e ambientais desta atividade.

Várias empresas, nomeadamente a Transportes Paulo Duarte, onde este estudo se baseou, já dão formação aos seus motoristas e usam ferramentas que avaliam a *performance* dos seus condutores de forma a incentivá-los a conduzir de forma mais responsável. Ferramentas comerciais deste género estão disponíveis e exemplos como o *Fleetboard* [53, 57] avaliam os condutores numa escala de 1 a 10 tendo em conta a forma como usam o acelerador e os diversos sistemas de travagem, a utilização do método de *coasting* em que o veículo se move sem acelerador usando os declives e a energia cinética acumulada, entre outros. Este tipo de equipamentos permite assim avaliar a *performance* dos condutores e as classificações que estes obtêm são muitas vezes o critério usado para a atribuição de prémios monetários aos melhores condutores.

Neste tipo de programas, os condutores são ensinados a adotarem um conjunto de comportamentos tendo em vista o aumento da eficiência energética, entre eles [5]:

- Preparação da viagem:

- Seleção de estradas com menores declives e estradas menos sinuosas;
- Leitura das previsões meteorológicas de forma a evitar condições adversas;
- Planear as pausas de forma a parar para realizar o descanso obrigatório durante alturas de temperatura mais amena, de forma a minimizar a necessidade do uso de ar condicionado;
- Tentar evitar a condução em cidade ou em zonas com tráfego lento (“para-arranca”);
- Usar mapas ou sistemas GPS para planear a melhor sequência de paragens, de forma a evitar andar para trás e para a frente;
- Planear a viagem do fim para o início, com base na hora de entrega, de forma a ter tempo para eventuais atrasos e assim evitar a necessidade de acelerar para cumprir prazos;

- Condução:

- Ligar o motor com a transmissão em ponto-morto e com a embraiagem completamente pressionada;
- Durante o período de aquecimento do motor, manter o motor sob cargas baixas. Se for necessário usar cargas elevadas, esperar que o motor atinja a temperatura ideal antes de arrancar;
- Ao arrancar, usar engrenar uma velocidade que seja suficiente para mover o veículo sem usar o acelerador;
- Usar o acelerador de forma suave e engrenar a velocidade seguinte assim que seja possível;
- Ao usar veículos com caixa manual, usar o método de “embraiagem dupla” (em inglês: “*double-clutching*”), pressionando primeiro a embraiagem para colocar a caixa em ponto-morto e pressionando de seguida a embraiagem uma segunda vez para engrenar a próxima velocidade;
- Usar velocidades moderadas em auto-estrada, preferencialmente com recurso a um limitador de velocidade;
- Manter velocidades constantes sempre que o percurso assim o permita, preferencialmente com recurso a um sistema *cruise-control*;
- Evitar períodos de *ralenti* desnecessários;
- Usar a topografia, nomeadamente usar descidas para ganhar momento que possa ser usado para ajudar a vencer eventuais subidas;
- Estar atento ao comportamento do tráfego circundante e mudanças de sinais luminosos como forma de antecipar eventuais travagens, evitando assim acelerações desnecessárias ou até a necessidade de parar;
- Uso do método de *coasting* [53] para reduzir o uso do acelerador;

- Manutenção:

- o Cumprir os prazos de manutenção anunciados pelo fabricante;
- o Verificar a pressão dos pneus regularmente;
- o Verificar o veículo regularmente, procurando eventuais problemas que aumentem o consumo (ex: fugas no sistema pneumático);
- o Verificar o sistema de ar condicionado e fazer uma manutenção atempada;
- o Verificar se os apêndices aerodinâmicos estão corretamente instalados e configurados corretamente, especialmente após a troca para reboques de configuração diferente.

Apesar do principal objetivo ser a redução dos gastos em combustíveis por parte das empresas de transportes, a eco-condução acaba por ter outros efeitos secundários não planeados, chamados de externalidades, que acabam por afetar outras pessoas que não os intervenientes. Neste caso as externalidades são a redução das emissões para a atmosfera, minimizando os impactes ambientais, como o efeito de estufa e degradação da qualidade do ar que respiramos, bem como um aumento da segurança e redução do risco de acidentes na estrada, associadas às velocidades mais moderadas e ao aumento de atenção que se exige aos condutores que praticam eco-condução [18, 58].

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados da aplicação de eco-condução a veículos pesados de mercadorias, com base em estudos realizados previamente

Tabela 3 - Exemplos de estudos relacionados com a eco-condução em veículos pesados de mercadorias

Método de treino	Contexto da avaliação	Local	Ano	Número de condutores	Redução do consumo	Referência
Condução em simulador	Simulador	Reino Unido	2005	>600	3,5%	[52]
Aulas de eco-condução	Condução em percurso fechado	Estados Unidos da América	2007	36	33,6% a 40,5%	[59]
Aulas de eco-condução	Condução em ambiente real num percurso pré-definido	Austrália	2009	12	27,3%	[53]
Aulas com <i>feedback</i> mensal e acompanhamento dos resultados	Condução em ambiente real	Europa	2010	322	9,4%	[54]
Formação individual durante a condução em veículo com sistema de monitorização em tempo real	Condução em ambiente real	Estados Unidos da América	2011	695	13,7%	[55]
Aulas	---	Japão	2013	~3000	8,7%	[60]
Formação individual durante a condução em veículo com sistema de monitorização em tempo real (com incentivos financeiros)	Condução em ambiente real	Estados Unidos da América	2014	46	2,6% (5,4% com incentivos) para " <i>sleepers cabs</i> " 5,2% (9,9% com incentivos) para " <i>day cabs</i> "	[6]

Alocação de frota

Outra forma de diminuir o impacte energético causado pela atividade das empresas de transportes de mercadorias passa por uma alocação mais cuidada das viaturas seleccionadas para cada tipo de aplicação [5]. Dependendo do tipo de serviço (peso da carga, tipo de percurso, nível de formação do condutor, etc) é possível que, devido às suas características, algumas viaturas se mostrem mais adequadas que outras, levando a menores consumos e emissões.

De forma a alocar as viaturas de forma a que o consumo total da frota desça é necessário estimar os consumos que cada viatura faria em cada serviço e distribuí-las de forma a obter o menor consumo possível. Assim, há que ter dados relativos aos serviços a realizar, que podem ser dinâmicas recolhidas previamente a bordo dos veículos tipicamente usados e há que ter ainda informações relativas ao perfil de consumo das viaturas, de forma a poder estimar consumos.

Para isso há que proceder a uma caracterização das viaturas da frota. Para esse processo há várias abordagens possíveis, no entanto há três que se destacam [61]:

- Modelos baseados na velocidade média, onde os consumos e emissões são função da velocidade média do veículo (ex: COPERT [62], MOBILE [63]);
- Modelos baseados na situação do trânsito, onde os fatores de consumos e emissões correspondem a situações de trânsito particulares (como para-arranca ou trânsito desimpedido) (ex:HBEFA [64], ARTEMIS [65]);
- Modelos baseados na dinâmica do veículo (ex: PHEM [66], CMEM [67], MOVES [68]), que se podem subdividir em dois tipos de modelos:
 - o Modelos baseados numa correlação entre a distribuição modal da potência utilizada e o consumo de combustível ou emissões, necessitando assim dos valores da velocidade e aceleração (dinâmica) do veículo a cada segundo como *inputs*, de forma a estimar a potência utilizada pelo veículo e consumos realizados durante essas viagens. Estes modelos eliminam assim a necessidade de dados específicos ao funcionamento do motor, como a rotação, posição do acelerador, binário disponibilizado, entre outros, sendo ideal em situações em que não é possível obter estas informações (como o caso do estudo realizado nesta dissertação), bastando apenas os dados da dinâmica que podem ser facilmente obtidos com um sistema de GPS com registo de dados;
 - o Modelos baseados no modelo de *Willan* para o motor de combustão interna, que usam dados como o mapa de consumo específico do motor, relações da caixa de velocidades, rotação do motor, eficiência da transmissão, perdas por atrito interno do motor, pressão média efetiva, caudal de combustível, poder calorífico e densidade do combustível. Estes tipos de modelos já provaram ser capazes de estimar consumos com uma precisão de 10% relativamente aos consumos reais [69].

Os modelos baseados na correlação entre potência utilizada e consumo ou emissões efetuadas usam uma distribuição modal da potência baseada na dinâmica e tipologia do veículo, no peso do mesmo e da topografia do terreno. Segundo o modelo MOVES2010a, para veículos ligeiros está definido o VSP, ou *Vehicle Specific Power*, enquanto que para pesados se utiliza o STP, ou *Scaled Tractive Power* [68]. Este método permite reduzir todos os parâmetros utilizados a uma só variável, o VSP ou STP, que pode ser diretamente relacionada com o consumo instantâneo de combustível [68, 70]. Este método apresenta a vantagem de utilizar dados provenientes de fontes não intrusivas (sensores dedicados, etc.), uma vez que

não é necessário proceder a modificações ao veículo nem à ligação à porta *On-Board Diagnostics* (OBD), sendo particularmente indicado para casos em que a medição de outros dados entraria em conflito com a garantia do fabricante.

No entanto, e apesar dos progressos realizados nos últimos anos, quer em termos de melhorias no design dos veículos (motores mais eficientes, cadeias motrizes com menos perdas, pneus com menor resistência ao rolamento, etc.) quer em termos de gestão de frotas (ferramentas como o *Fleetboard*, formação dos condutores, etc.) foram identificadas algumas lacunas na literatura às quais esta dissertação tentará dar resposta, dentro das quais se salientam:

- Inexistência de um método numérico de simulação dos efeitos da aplicação de eco-condução;
- Inexistência de um método numérico de comparação direta de viaturas a um nível individual, de forma a otimizar a forma como estas são alocadas e assim levar a uma diminuição dos consumos globais da frota; e
- Inexistência de um método de caracterização do perfil de consumo de viaturas pesadas de mercadorias, tendo como base medições efetuadas em ambiente real de funcionamento, que possa ser usada como base dos métodos numéricos anteriores;

3 – Metodologia de aquisição e análise de dados

3.1 – Caso de estudo

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação decorreu na empresa Transportes Paulo Duarte, sediada em Torres Vedras. Esta empresa conta atualmente com cerca de 550 viaturas que percorrem cerca de 65 milhões de quilómetros anualmente. Esta é uma empresa que se mostra muito interessada na implementação de medidas de eficiência energética, tendo adquirido uma viatura movida a GNL para testar o potencial desta tecnologia e dando formação de eco-condução aos seus condutores através de aulas, através do acompanhamento dos condutores em ambiente real de condução com um perito em eco-condução e através da monitorização contínua da *performance* dos condutores com recurso à ferramenta *Fleetboard*, que é usada para avaliar os condutores e para atribuir prémios baseados nas poupanças em combustível conseguidas pelos melhores condutores.

Este estudo incidiu sobre as viaturas pesadas de mercadorias (cerca de 200 conjuntos trator/semirreboque) e formas de redução do consumo efetuado pelas mesmas. Todos os ensaios foram realizados durante o horário diurno e durante o verão de 2015.

Não sendo possível caracterizar todas as viaturas da frota, foi necessário escolher cuidadosamente os veículos a analisar. Foram selecionadas viaturas representativas da frota da empresa, cobrindo a gama de potências disponíveis, estudando modelos de diferentes construtores e com diferentes idades e quilometragens. No que concerne aos veículos a gasóleo, as viaturas analisadas compreendem cerca de 60% da frota total. Foi ainda dada particular atenção à viatura movida a GNL, uma vez que esta é uma tecnologia recentemente introduzida que pretende ser uma alternativa viável às viaturas a gasóleo. As viaturas caracterizadas encontram-se indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Viaturas caracterizadas

Veículo	Marca	Potência (cv)	Motor		Idade	Quilometragem (km)	Combustível	% frota
			Cilindrada (litros)	Cilindros				
1	Mercedes	440	12	6	5 anos	850 000	Gasóleo	30
2						720 000		
3						650 000		
4		420			6 meses	70 000			10
5	MAN	440	12	6	5 anos	80 000	Gasóleo	5
6	Volvo	400			5 anos	800 000		15
7					7 anos	1 000 000		
8	IVECO	330	7,8		1 ano	150 000	Gás Natural	≈0

Para se proceder à caracterização das viaturas foi necessário desenvolver uma metodologia de análise apropriada, assente em torno das especificidades deste caso de estudo. Sendo esta uma análise do consumo de viaturas em ambiente real de condução, toda a metodologia foi

desenhada tendo por base uma medição dos consumos de combustível e registo das dinâmicas de condução (topografia, velocidade e aceleração instantâneas) associadas a tais consumos. Estes dados de dinâmica de condução e de consumo podem ser obtidos com recurso a sensores específicos, nomeadamente laboratórios portáteis [71, 70], dados dos sensores incluídos no próprio veículo [71, 70], etc.

A definição do tipo de dados a recolher resultou de uma avaliação em parceria com os responsáveis da Transportes Paulo Duarte. Como exemplo, constatou-se que a medição de dados do veículo com recurso à porta *On-Board Diagnostics* (OBD) para ler os parâmetros do motor não seria possível, pois tal entraria em conflito com as garantias dos fabricantes dos veículos. Em viaturas mais antigas, a garantia não seria problema, mas dada a necessidade de ter uma metodologia e procedimento experimental universais para todas as viaturas esta solução não seria adequada. O mesmo se verificou na hipótese da instalação de um caudalímetro para a medição do consumo instantâneo de combustível, que iria necessitar de intervenções mecânicas e anular a garantia das viaturas, pelo que não foi possível usar este equipamento.

Assim concluiu-se que a metodologia a desenvolver poderia contar apenas com a dinâmica do veículo recolhida com um sistema de GPS e com o consumo total realizado, medido no momento do abastecimento do veículo, no final de cada viagem.

3.2 – Metodologia de análise de dados STP

Após determinar os dados aos quais seria possível ter acesso e quais seriam inviáveis de registar, foi necessário encontrar uma metodologia que permita caracterizar a dinâmica de funcionamento dos veículos.

Assim, foi decidido usar a metodologia STP, do inglês Scaled Tractive Power, desenvolvida pelo governo norte-americano para estimar emissões poluentes de veículos pesados de mercadorias com a ferramenta MOVES2010 [68, 72]. Esta metodologia foi selecionada precisamente por se encaixar no contexto do problema, requerendo apenas o registo dos dados da dinâmica e da topografia percorrida para descrever a potência usada pelo veículo ao longo de uma viagem, ambos possíveis de obter com um sistema GPS com altímetro barométrico. Esta técnica é conceptualmente semelhante à metodologia VSP, do inglês Vehicle Specific Power [68, 70], utilizada para a caracterização de veículos ligeiros e que permite avaliar a potência instantânea usada por um veículo com base nos dados recolhidos da dinâmica. No entanto, dadas as diferenças entre as tipologias de veículos, o VSP não se adequa a pesados de mercadorias, sendo assim usado o STP.

3.2.1 – Procedimento experimental para recolha de dados

Os dados necessários à caracterização dos veículos, de acordo com a metodologia a utilizar e as restrições de operação, encontram-se apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados utilizados para a caracterização da viatura

Variável	Método de aquisição	Método de cálculo	Frequência de aquisição
Velocidade	GPS com altímetro barométrico embutido (GPSMap 76CSx da Garmin) que regista a posição e elevação do veículo	Variação da posição a cada segundo	1 Hz
Aceleração		Variação da velocidade calculada a cada segundo	1 Hz
Declive		Quociente entre a variação da elevação e a distância percorrida	1 Hz
Peso	Balança de veículos pesados (marca Cachapuz com precisão de 10 kg)	Leitura do valor na balança	No início e no final de cada viagem
Consumo total da viagem	Abastecimento do veículo	Leitura do volume de combustível abastecido	No final da viagem

Os dados relativos à dinâmica e à topografia foram recolhidos com um sensor standalone de GPS, modelo GPSMap 76CSx da Garmin (Figura 9), modelo que foi escolhido por incluir um altímetro barométrico, cuja medição da elevação é muito mais precisa (<0,5 m) do que aquela fornecida pelo sistema GPS [71].

Com base nos dados de latitude e longitude e sabendo que o tempo entre medições é 1 Hz torna-se possível calcular a velocidade a cada segundo. De forma análoga, sabendo a velocidade em cada segundo é também possível calcular a aceleração do veículo a cada segundo. Com a variação da posição (longitudinal) e com a variação da elevação torna-se possível saber o declive do terreno em que o veículo circulou.



Figura 9 - GPSMap 76 CSx da Garmin, utilizado para a recolha dos dados relativos à dinâmica e topografia [73]

O peso foi sempre medido com a balança de pesados da marca Cachapuz (semelhante à da Figura 10) localizada nas instalações da Modis e apresenta uma precisão de medição de 10 kg. Assim, o peso é registado após o carregamento do veículo nas instalações da Modis na Azambuja, de forma a saber a massa do conjunto na viagem de ida, até à descarga do veículo no local para o qual a carga se destinava. Após a descarga, o veículo regressa às instalações da Modis e é pesado na mesma balança e o peso na viagem de regresso é registado.



Figura 10 - Exemplo de uma balança para pesados da marca Cachapuz [74]

Para a medição do consumo global foi utilizado o valor indicado pela bomba de abastecimento localizada nas instalações da Transportes Paulo Duarte na Azambuja, local no qual foram realizados todos os abastecimentos das viaturas estudadas nesta dissertação.

Para a recolha de todos os dados necessários foi desenvolvido e utilizado o seguinte procedimento experimental:

1. No início da viagem, o condutor pesa o veículo após este ter sido carregado de forma a saber o peso no início da viagem.
2. O condutor dirige-se ao posto de abastecimento de combustível onde o veículo é abastecido até ao topo do depósito de forma a ter um abastecimento de referência. Este passo é muito importante dado que quando a bomba de abastecimento deteta que o depósito está quase cheio (havendo um “clique” e a consequente paragem do abastecimento) ainda é possível encher o depósito com bastantes litros de combustível. Dado que a altura a que a bomba para o abastecimento depende da forma como a pistola é inserida no bocal do depósito, torna-se possível haver disparidades na forma como o depósito é abastecido o que leva a valores de consumo errados. Assim, após o “clique” da bomba, a pistola é removida de forma a ser possível o enchimento do depósito na sua totalidade. No caso de depósitos com sistemas antirroubo é necessário esperar algum

- tempo para garantir que a espuma formada por este sistema se dissipe de forma a garantir que o depósito é enchido até ao máximo da sua capacidade.
3. Enquanto o depósito é enchido, o GPS é ligado e a antena colocada no exterior do veículo, ligado a uma parte metálica de forma a captar o sinal do maior número possível de satélites, para garantir melhor precisão na medição da posição. Durante este tempo inicial o registo de dados está desligado de forma a garantir que não são registados dados enquanto a viagem ainda não começou.
 4. Após o abastecimento, o peso do veículo é recalculado, somando o peso dos ocupantes e do combustível adicionado (usando uma densidade de 0,83 kg/l para o gasóleo ou o valor em kg para o GNL) ao valor medido na balança para pesados. Este é o valor usado para os cálculos, na secção inicial da viagem.
 5. Uma vez abastecido o veículo e registados os valores necessários, o condutor inicia a viagem e o registo de dados do GPS é ligado no momento em que o condutor liga o motor.
 6. O condutor segue a viagem como seguiria em qualquer outra situação e o GPS é mantido ligado sempre que o motor está em funcionamento. Da mesma forma, quando o motor é desligado o registo de dados é desligado.
 7. Sempre que o condutor para o veículo, mas o motor é mantido ligado, o tempo gasto em ralenti é medido com um cronómetro de forma a saber quanto tempo foi despendido assim. Isto é necessário, uma vez que o modelo do GPS utilizado termina o registo de dados sempre que o veículo para de se movimentar como forma de poupar espaço no cartão de memória interno. No caso de se utilizar um GPS que não possua esta característica, este passo deixa de ser necessário.
 8. Após o final da viagem, o veículo é pesado de forma a saber qual o peso no regresso e depois é levado até à mesma bomba de abastecimento usada no início da viagem (e em todas as viagens). No momento em que o condutor para o motor neste local, o GPS é desligado e a viagem é dada como terminada.
 9. O veículo é abastecido como foi descrito no ponto 2 e o valor registado representa o combustível gasto relativo a toda a dinâmica de condução.

Ao usar um GPS com altímetro barométrico para registar os dados relativos à dinâmica do veículo e à topografia do percurso realizado pelo mesmo estamos sujeitos a várias possíveis fontes de erros, como erros no cálculo da posição devido a possíveis perturbações que alterem o tempo de viagem do sinal ou erros devidos à variação da pressão barométrica ao longo do dia.

Assim, há dois aspetos que se devem ter em consideração:

- O altímetro barométrico, que usa a pressão atmosférica para calcular a elevação, é afetado pelas condições atmosféricas que fazem variar a pressão e, conseqüentemente, a leitura do GPS. No entanto, dado que este é um estudo realizado com veículos em

movimento, a taxa de variação da elevação causada pela movimentação do veículo é muito maior que a taxa da variação da elevação causada por potenciais variações atmosféricas, pelo que este efeito pode ser desprezado [71].

- Como este tipo de equipamentos regista os dados em intervalos discretos, tipicamente com uma frequência de 1Hz, há a possibilidade de subestimar a distância percorrida pelo veículo. Isto deve-se ao facto de os cálculos realizados assumirem que a distância entre pontos é percorrida em linha reta [71]. Como a distância em linha reta entre dois pontos é sempre a menor distância que se pode percorrer entre esses mesmos dois pontos, se o veículo estiver em curva ou a percorrer uma estrada cuja elevação não varie de forma linear, a distância calculada é inferior à real.

Este procedimento foi seguido em todos os ensaios de forma a garantir a consistência das medições, com todas as viaturas a ser sujeitas aos mesmos processos de medição. Os ensaios realizados para a caracterização das viaturas e validação da ferramenta encontram-se sumarizados na Tabela 6. Nesta tabela são apresentadas todas as viagens realizadas em cada uma das viaturas estudadas, indicando a velocidade média e duração de cada uma, bem como o tipo de percurso e experiência do condutor. A cada grupo de viagens realizadas com uma viatura distinta é dada a designação de serviço, que representa o tipo de utilização a que cada viatura é tipicamente sujeita. Assim, para o cálculo dos impactes das medidas de eficiência energética, são apresentados os resultados por serviço e não por viagem individual. Isto deve-se ao facto de a empresa funcionar de forma a que, durante o dia de trabalho, o motorista use sempre a mesma viatura e que, quando são feitas duas viagens no mesmo dia, o par de viagens tenha que ser compatível entre si, de forma a que o limite máximo de horas de condução diárias não seja ultrapassado. Assim, quando se seleciona a distribuição de viaturas ideal, que é aquela que minimiza o consumo, é necessário garantir que as viaturas selecionadas são as melhores para cada serviço e não para cada viagem individual.

Se, por exemplo, para a primeira entrega do dia a viatura com o menor consumo é a viatura 1 e para a segunda entrega do dia a melhor viatura é a viatura 2, mas na soma das duas entregas a viatura com o menor consumo é a viatura 3, a viatura 3 é a viatura selecionada.

Em cada tipo de veículo foi acompanhado apenas um condutor, com exceção do veículo 8, movido a gás natural, em que foram acompanhados dois condutores distintos, mas com níveis de formação e experiência semelhantes.

Tabela 6 - Viagens realizadas

Veículo	Viagens	Serviço	Duração	Velocidade média (km/h)	% auto-estrada	% cidade	% extra-urbano	% ($|declive| > 4\%$)	Experiência do condutor
1	1	A	4h06min	68,0	0	10	90	41,9	Com formação / experiência moderada
	2		3h59min	69,8	0	15	85	49,7	
	3		7h39min	72,7	0	5	95	19,2	
2	1	B	4h12min	71,3	0	5	95	45,2	Com formação / experiência moderada
	2		4h01min	74,2	10	5	85	52,9	
	3		8h04min	68,9	5	5	90	45,7	
3	1	C	4h13min	66,4	0	15	85	40,1	Com formação / experiência moderada
	2		4h09min	71,7	10	10	80	44,9	
	3		4h04min	74,2	10	10	80	52,8	
4	1	D	5h06min	68,0	0	10	90	38,7	Com formação / elevada experiência
	2		4h21min	78,0	0	5	95	22,2	
5	1	E	4h02min	69,7	5	5	90	21,9	Sem formação / experiência reduzida
	2		3h49min	72,9	5	5	90	18,7	
	3		4h11min	71,4	5	5	90	45,0	
6	1	F	1h54min	51,6	5	35	60	44,7	Com formação / experiência moderada
	2		3h49min	68,6	5	25	70	22,3	
7	1	G	3h04min	47,2	0	40	60	43,1	Com formação / elevada experiência
	2		3h49min	53,0	0	35	65	34,4	
	3		2h15min	60,7	5	35	60	52,6	
8	1	H	4h30min	58,0	10	10	80	43,1	Com formação / experiência moderada
	2		1h54min	51,6	10	5	85	34,4	
	3		1h31min	68,4	25	15	60	52,6	
	4		4h20min	49,7	20	10	70	43,1	

3.2.2 – Metodologia de análise de dados

Como mencionado acima, foi utilizado o STP para a caracterização do modo de funcionamento do veículo, de acordo com a equação 2 [68].

$$STP_t = \frac{Av_t + Bv_t^2 + Cv_t^3 + mv_t(a_t + g\sin\theta)}{f_{escala}} \quad (Eq. 2)$$

em que:

STP_t = scaled tractive power no instante t em kW (scaled)

v_t = velocidade no instante t (m/s)
 a_t = aceleração no instante t (m/s²)
 A = factor de resistência ao rolamento (kW.s/m)
 B = factor de resistência à rotação (kW.s²/m²)
 C = factor de resistência aerodinâmica (kW.s³/m³)
 m = massa do conjunto (toneladas)
 f_{escala} = factor de escala, que toma o valor fixo de 17,1
 g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²)
 $\sin \theta$ é o declive, sob a forma de fração

Os fatores A, B e C utilizados para este tipo de veículos (conforme os veículos da Transportes Paulo Duarte analisados neste trabalho) são baseados no estudo efetuado por V.A. Petrushov e são apresentados na Tabela 7 [72].

Tabela 7 - Fatores para o cálculo do STP

Fator (por tonelada métrica)	Pesados de mercadorias (de 3,855 a 6,350 toneladas)	Pesados de mercadorias (de 6,350 a 14,968 toneladas)	Pesados de mercadorias (> 14,968 toneladas)	Autocarros
$\frac{A}{M} \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{1000 \text{ kg}} \right)$	0,0996	0,0875	0,0661	0,0643
$\frac{B}{M} \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{s}^2}{1000 \text{ kg}} \right)$	0	0	0	0
$\frac{C}{M} \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{s}^3}{1000 \text{ kg}} \right)$	$\frac{1,47}{\text{massa}(kg)} + 5,22$ $\times 10^{-5}$	$\frac{1,93}{\text{massa}(kg)} + 5,90$ $\times 10^{-5}$	$\frac{2,89}{\text{massa}(kg)} + 4,21 \times 10^{-5}$	$\frac{3,22}{\text{massa}(kg)} + 5,06 \times 10^{-5}$

O fator B apresenta o valor de 0 dado que a sua contribuição para a potência total utilizada é muito reduzida, podendo ser desprezada e tomando assim o valor 0.

As potências calculadas (STP's) foram organizadas numa distribuição modal, de acordo com a Tabela 8. Como se pode verificar, o STP pode apresentar valores positivos, negativos ou tomar o valor de zero. O valor de zero destina-se ao *ralenti*, aqui definido como uma situação em que o veículo está parado com o motor a trabalhar. Os valores positivos representam situações em que o motor do veículo se encontra sobre carga, como por exemplo, durante aceleração ou quando a aceleração é nula, mas o condutor tem que atuar sobre o acelerador para manter a velocidade do veículo. Por outro lado, os valores negativos representam tipicamente situações de travagem.

Tabela 8 - Distribuição modal do STP

Classe STP	STP	Classe STP	STP	Classe STP	STP
-60	]- ∞, -59]	-19	]-19, -18]	22	[21, 22[
-59	]-59, -58]	-18	]-18, -17]	23	[22, 23[
-58	]-58, -57]	-17	]-17, -16]	24	[23, 24[
-57	]-57, -56]	-16	]-16, -15]	25	[24, 25[
-56	]-56, -55]	-15	]-15, -14]	26	[25, 26[
-55	]-55, -54]	-14	]-14, -13]	27	[26, 27[
-54	]-54, -53]	-13	]-13, -12]	28	[27, 28[
-53	]-53, -52]	-12	]-12, -11]	29	[28, 29[
-52	]-52, -51]	-11	]-11, -10]	30	[29, 30[
-51	]-51, -50]	-10	]-10, -9]	31	[30, 31[
-50	]-50, -49]	-9	]-9, -8]	32	[31, 32[
-49	]-49, -48]	-8	]-8, -7]	33	[32, 33[
-48	]-48, -47]	-7	]-7, -6]	34	[33, 34[
-47	]-47, -46]	-6	]-6, -5]	35	[34, 35[
-46	]-46, -45]	-5	]-5, -4]	36	[35, 36[
-45	]-45, -44]	-4	]-4, -3]	37	[36, 37[
-44	]-44, -43]	-3	]-3, -2]	38	[37, 38[
-43	]-43, -42]	-2	]-2, -1]	39	[38, 39[
-42	]-42, -41]	-1	]-1, 0]	40	[39, 40[
-41	]-42, -40]	0	0	41	[40, 41[
-40	]-40, -39]	1	]0, 1[	42	[41, 42[
-39	]-39, -38]	2	]1, 2[	43	[42, 43[
-38	]-38, -37]	3	]2, 3[	44	[43, 44[
-37	]-37, -36]	4	]3, 4[	45	[44, 45[
-36	]-36, -35]	5	]4, 5[	46	[45, 46[
-35	]-35, -34]	6	]5, 6[	47	[46, 47[
-34	]-34, -33]	7	]6, 7[	48	[47, 48[
-33	]-33, -32]	8	]7, 8[	49	[48, 49[
-32	]-32, -31]	9	]8, 9[	50	[49, 50[
-31	]-31, -30]	10	]9, 10[	51	[50, 51[
-30	]-30, -29]	11	]10, 11[	52	[51, 52[
-29	]-29, -28]	12	]11, 12[	53	[52, 53[
-28	]-28, -27]	13	]12, 13[	54	[53, 54[
-27	]-27, -26]	14	]13, 14[	55	[54, 55[
-26	]-26, -25]	15	]14, 15[	56	[55, 56[
-25	]-25, -24]	16	]15, 16[	57	[56, 57[
-24	]-24, -23]	17	]16, 17[	58	[57, 58[
-23	]-23, -22]	18	]17, 18[	59	[58, 59[
-22	]-22, -21]	19	]18, 19[	60	[59, ∞[
-21	]-21, -20]	20	]19, 20[
-20	]-20, -19]	21	]20, 21[

3.3 – Metodologia para estimar curvas de consumo de combustível

Para proceder ao cálculo da curva de consumo de uma viatura em função da potência requerida, é necessário reduzir os ciclos de velocidades de cada viagem registada a uma distribuição modal da potência ao longo de cada ciclo. A Figura 11 apresenta um exemplo da distribuição temporal do STP ao longo de uma viagem:

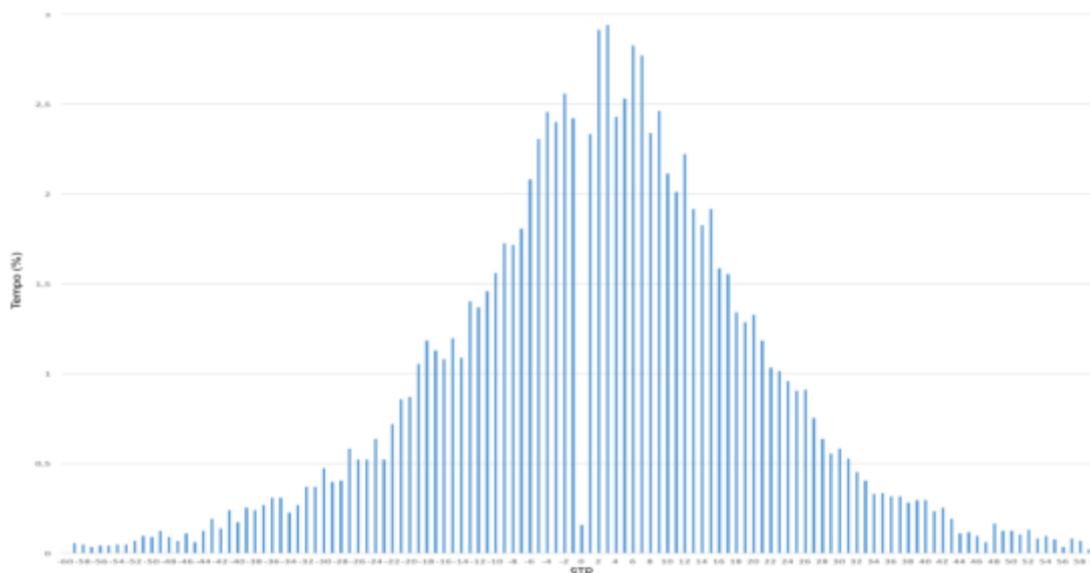


Figura 11 - Exemplo da distribuição temporal do STP de uma viagem

Uma vez obtidas as distribuições modais do STP para os ciclos de velocidade, é possível usá-las, juntamente com os consumos medidos, para obter as curvas de consumo características de cada viatura.

Neste trabalho foi assumido que a curva de consumo típica deste tipo de viaturas apresenta uma forma semelhante aquela que foi assumida para viaturas ligeiras de passageiros [70] ou pesados de transporte coletivo de passageiros [75], e que apresenta o formato indicado na Figura 12, apresentando 3 comportamentos distintos:

- Para potências negativas mais baixas, apresenta um valor constante (consumo não varia com a potência);
- Para potências em torno de zero (tanto positivas como negativas), o consumo varia quadraticamente com a variação da potência;
- Para potências positivas mais altas, o consumo evolui de forma linear com a potência.

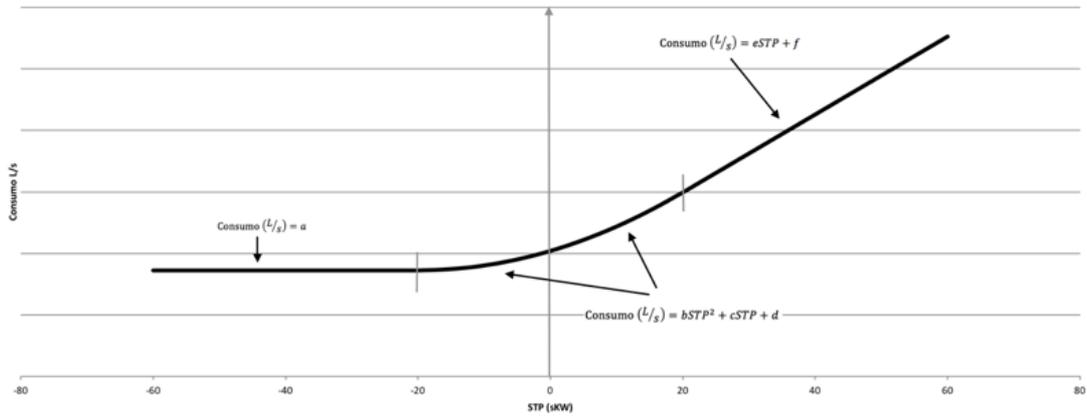


Figura 12 - Exemplo da curva de consumo característica

Para esta aplicação em particular, e dada a inexistência de literatura que relacione o consumo instantâneo com a distribuição modal do STP, foi necessário proceder a um processo de tentativa e erro para encontrar os pontos de continuidade entre as equações que descrevem a curva de consumo. Assim, usando como referência os resultados obtidos para as curvas de consumo de veículos pesados de transporte coletivo de passageiros [75] e variando os pontos de continuidade para obter diferentes perfis de consumo, foi possível estimar numericamente consumos e consequentes desvios, e com isso localizar os pontos em -20 e 20, o par que forneceu estimativas com desvios mais baixos e consistentes. Assim resulta:

- Para valores de STP inferiores a -20 o valor do consumo é constante:

$$STP < -20 \Rightarrow \text{Consumo } (L/s) = a \quad (\text{Eq. 3})$$

- Para valores de STP compreendidos entre -20 e 20 o valor do consumo varia quadraticamente com a potência:

$$-20 \leq STP \leq 20 \Rightarrow \text{Consumo } (L/s) = bSTP^2 + cSTP + d \quad (\text{Eq. 4})$$

- Para valores de STP superiores a 20 o consumo varia linearmente com a potência:

$$STP > 20 \Rightarrow \text{Consumo } (L/s) = eSTP + f \quad (\text{Eq. 5})$$

As variáveis a, b, c, d, e e f foram determinadas recorrendo a um sistema de 6 equações, em que quatro dessas equações são condições de continuidade: duas equações para a continuidade da curva em -20 e 20 e duas equações para a continuidade da primeira derivada da curva em -20 e 20. Assim, sobram duas equações, correspondentes à dinâmica de duas viagens distintas e ao consumo realizado em cada uma delas.

O consumo total (em litros) é dado pelo somatório do consumo em cada modo (l/s), multiplicado pelo tempo (s) em cada modo i do STP do ciclo de condução (equação 6):

$$Consumo\ total = \sum_{i=-60}^{60} Consumo_i \times t_i \quad (Eq. 6)$$

em que:

$Consumo\ total$ = valor do consumo total da viagem (l)

$Consumo_i$ = valor do consumo no modo i da potência STP (l/s)

t_i = tempo de condução no modo i (s)

Assim, definindo o sistema de equações do qual resultam os valores das variáveis a, b, c, d, e e f tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} Consumo_{viagem\ 1} = \sum_{-60}^{-21} a \times t_{STP} + \sum_{-20}^{-1} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \delta (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP=0} + \sum_{1}^{20} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \sum_{21}^{60} (eSTP + f) \times t_{STP} \\ Consumo_{viagem\ 2} = \sum_{-60}^{-21} a \times t_{STP} + \sum_{-20}^{-1} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \delta (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP=0} + \sum_{1}^{20} (bSTP^2 + cSTP + d) \times t_{STP} + \sum_{21}^{60} (eSTP + f) \times t_{STP} \\ b \times (-20)^2 + c \times (-20) + d = a \\ 2b \times (-20) + c = 0 \\ b \times 20^2 + c \times 20 + d = e \times 20 + f \\ 2b \times 20 + c = e \end{array} \right.$$

(Eq. 7)

O parâmetro δ , relativo ao consumo ao *ralenti*, foi calculado de um modo iterativo. Em primeiro lugar foi usado o valor de $\delta = 1$ foram são calculados os valores das variáveis.

Quando a viatura se encontra em *ralenti* o STP toma o valor de 0, então para STP=0 reduz-se a:

$$\delta \times d = \text{"consumo típico em ralenti"} \quad (Eq. 8)$$

O valor de d já é conhecido de anteriormente. Usando o valor típico de 3,2 l/h, [76] ou seja, $8,89 \times 10^{-4}$ l/s, foi possível calcular o valor de δ . Sabendo o valor de δ , as variáveis a, b, c, d, e e f foram recalculadas e com o novo valor de d voltou-se a calcular δ .

Este processo foi então repetido até o valor de δ convergir e foi verificado que para esta aplicação o valor de δ é 0,22.

Uma vez calculado o valor de δ , são registados os valores finais das variáveis a, b, c, d, e e f pois são esses que caracterizam o perfil de consumo das viaturas.

4 – Desenvolvimento de metodologias para quantificação de impactes

Uma vez obtidas as curvas de consumo características de cada veículo, torna-se possível utilizá-las para estimar os possíveis impactes resultantes da implementação de medidas de eco-condução e racionalização de frota. Para isso foram desenvolvidas as metodologias que se apresentam nos subcapítulos seguintes.

4.1 – Metodologia para a quantificação dos impactes da eco-condução

Os dados referentes às viagens cujas dinâmicas foram recolhidas podem ser usados para estimar os impactes resultantes da implementação de medidas de eco-condução. Através do desenvolvimento de um método computacional implementado em Matlab (versão R2014b) para reformular a dinâmica das viagens (isto é, o ciclo de velocidades), nomeadamente os valores da velocidade e aceleração instantâneas, torna-se possível obter uma nova dinâmica (uma nova distribuição de STP's) que, em conjunto com a curva de consumo resultante da caracterização das viaturas, pode ser usada para prever as poupanças que se podem obter com a introdução de uma política de eco-condução, comparativamente ao ciclo de condução inicial.

Esta ferramenta numérica recebe os dados da dinâmica da viagem como foi originalmente realizada (velocidade, aceleração, topografia, etc) e verifica se certas condições ocorrem. Estas condições são o cumprimento dos valores que o utilizador insere para as velocidades e acelerações máximas permitidas ao veículo.

Esses valores máximos foram obtidos através da análise dos perfis de condução de condutores que já tiveram formação de eco-condução e que se encontram classificados como os melhores condutores da empresa na ferramenta *Fleetboard* [57], a ferramenta comercial que a empresa usa para avaliar a *performance* dos seus motoristas.

Após a análise do perfil de condução desses condutores, foram escolhidos os seguintes valores para a velocidade e aceleração instantânea máxima permitidas:

- Para piso plano (declive entre -4% e 4%) verificou-se uma velocidade máxima de 85 km/h e uma aceleração de 0,4 m/s².
- Para descidas (declive inferior a -4%) verificou-se uma velocidade máxima de 90 km/h e uma aceleração de 0,5 m/s².
- Para subidas (declive superior a 4%) verificou-se uma velocidade máxima de 75 km/h e uma aceleração de 0,3 m/s².

Verificou-se ainda não haver relação direta entre as velocidades e acelerações praticadas e o peso do veículo, pelo que estes valores não variam com o peso do veículo.

Desta forma torna-se possível estimar o consumo que um condutor altamente treinado e experiente faria face ao consumo realizado por um condutor menos experiente, permitindo assim estimar as poupanças que se podem obter uma vez que todos os condutores tenham sido devidamente treinados.

Para garantir que a simulação é representativa daquilo que poderia ser uma viagem realizada por outro condutor mais experiente, há algumas regras que têm que ser cumpridas, nomeadamente:

- Ao ajustar o ciclo de condução com novos valores de velocidade e aceleração vai ser obtido um perfil de condução em que não se atinge a mesma distância no mesmo instante que na viagem original. Assim, para garantir que os valores são sempre lidos de forma correta, é necessário garantir que o ficheiro da viagem original é lido numa base de distância e não numa base temporal. Isto garante que os valores da velocidade, aceleração e declive da viagem original são sempre lidos de forma correta, mesmo que na simulação o veículo demore mais tempo que na viagem original;
- Nunca exceder a velocidade do ciclo original. Este critério é fundamental pois garante que os limites de velocidade são cumpridos e que as condições de trânsito que o veículo encontrou na realidade são replicadas (ex.: veículos em marcha lenta ou trânsito parado);
- Nunca exceder a aceleração do ciclo original. Este critério garante que o ciclo corrigido nunca excede a aceleração feita pelo condutor na viagem real de forma a garantir que não é usada mais potência do que foi usada na realidade de forma a garantir que os consumos estimados são inferiores aqueles obtidos na viagem real;

Assim, após a utilização desta ferramenta numérica, resulta uma distribuição temporal de STP para a viagem corrigida com eco-condução que é combinada com a curva de consumo da viatura que fez a viagem original, de modo a fornecer um novo valor para o consumo de combustível da viagem corrigida. Deste modo, o novo consumo que tem em conta o efeito da eco-condução, é comparado com o consumo original, resultando numa estimativa da redução do consumo de combustível através da aplicação destas medidas.

A Figura 13 apresenta um exemplo do perfil de velocidades de uma viagem, apresentando o perfil originalmente medido, sem eco-condução, e o perfil de velocidades resultante da ferramenta desenvolvida, que contabiliza o efeito da eco-condução.

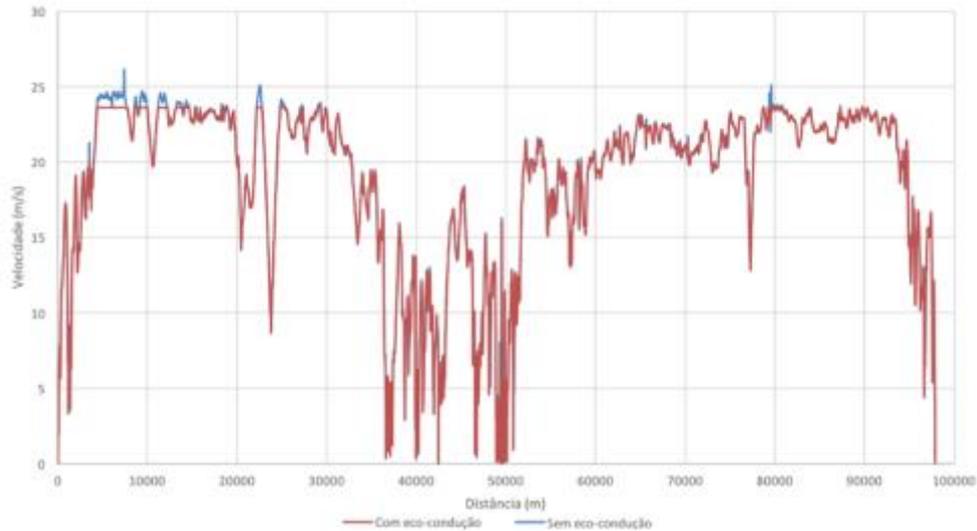


Figura 13 - Perfil de velocidades de uma viagem antes e depois da eco-condução

A Figura 14 apresenta um segmento de um perfil de velocidades original e o perfil resultante da aplicação de eco-condução:

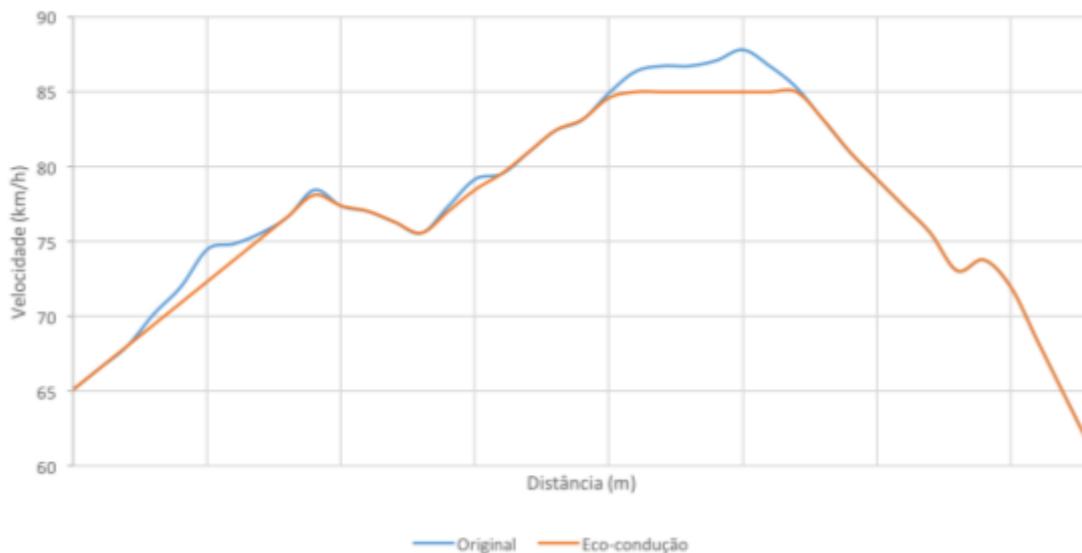


Figura 14 - Comparação de um excerto de uma dinâmica com e sem o efeito da eco-condução

Nesta figura é possível observar o efeito da aplicação do código desenvolvido, nomeadamente o efeito da implementação de limites de velocidade e aceleração. Como se pode verificar, sempre que o perfil de velocidades apresenta um declive (aceleração) maior que o permitido, o perfil corrigido com eco-condução fica-se por esse mesmo limite. Além disso, sempre que a velocidade máxima permitida é ultrapassada pela dinâmica original, o algoritmo reescreve a dinâmica ficando-se pelo limite estipulado. Isto leva a um perfil de velocidades mais suave, com menos variações bruscas de velocidade e menores velocidades máximas a serem atingidas, o

que leva a uma redução da potência requerida e, conseqüentemente, do consumo de combustível associado.

A Figura 15 apresenta uma comparação entre uma dinâmica original e uma dinâmica corrigida com eco-condução, desta vez sob a forma de uma distribuição temporal de STP.

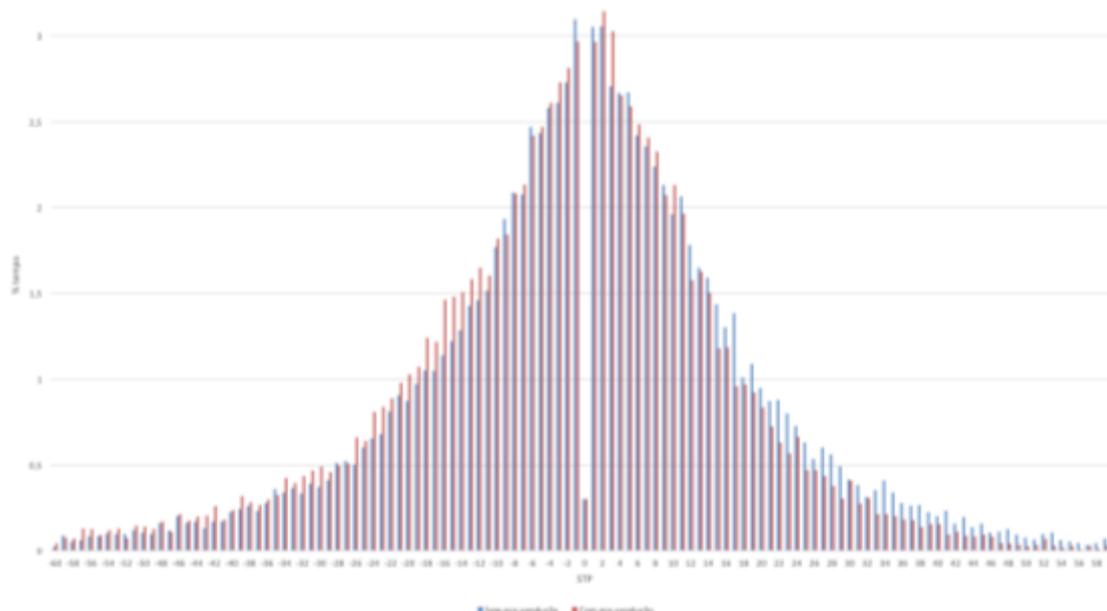


Figura 15 - Comparação da distribuição de STP de uma viagem antes e após a aplicação de eco-condução

É possível verificar que o algoritmo desenvolvido cria uma dinâmica corrigida que resulta numa nova distribuição temporal de STP que, quando comparada com a distribuição original, apresenta maior concentração na gama de potências baixas e médias, onde o consumo é menor, e uma menor incidência na gama de potências altas, onde o consumo é maior. Ao usar a nova distribuição de STP em conjunto com a curva de consumo da viatura, torna-se possível estimar o novo consumo de combustível, que contabiliza o impacto da eco-condução. Comparando este valor com o consumo original resulta uma melhoria que é indicadora do potencial energético da implementação deste tipo de medidas.

4.2 – Metodologia para a quantificação dos impactes da alocação de viaturas

Para além da modificação ao comportamento dos condutores, através da implementação de medidas de eco-condução, também é possível reduzir os consumos da frota através de uma seleção mais cuidada dos veículos a alocar a cada viagem.

Assim foi desenvolvida uma ferramenta computacional em Matlab (versão R2014b) que permite simular numericamente o comportamento que qualquer uma das viaturas caracterizadas teria em determinada viagem, obtendo uma distribuição de STP para cada uma delas, mesmo que apenas a viatura original tenha sido efetivamente utilizada na estrada. Isto permite estimar qual

a viatura mais adequada para cada tipo de serviço, assumindo que o fator humano (o condutor) apresenta um comportamento igual em todos os casos.

Através da modificação da ferramenta descrita no subcapítulo 4.1, é possível simular o comportamento de qualquer viatura, baseando-se apenas no valor da potência máxima disponível em cada uma das viaturas de substituição.

Assim, se a viatura utilizada originalmente e para a qual foi recolhida a dinâmica original apresenta uma potência máxima de 420 cv, ao simular a dinâmica para uma viatura de potência igual ou superior a esses 420 cv, assume-se que as essas viaturas conseguem acompanhar a dinâmica da viatura original, pelo que a dinâmica resultante é em tudo igual à dinâmica original.

No entanto, ao simular a dinâmica para uma viatura de potência inferior, como por exemplo o veículo IVECO a GNL que apresenta uma potência máxima de 330 cv, sempre que a viatura original (que tinha 420 cv) utiliza uma potência superior a 330 cv (o máximo da viatura de substituição em estudo), assume-se que essa viatura de substituição não tem potência para acompanhar a dinâmica original e por isso o ciclo tem que ser ajustado de acordo com a potência máxima que o veículo de substituição consegue produzir.

Para verificar a potência utilizada em cada instante foi utilizada a seguinte equação, resultante do balanço de forças aplicado ao veículo:

$$\text{potência utilizada} = \left(mg\lambda v + C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A_f + m(a + g \sin \theta) \right) \cdot v \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

potência utilizada = potência que o veículo usa em cada instante (W)

m = massa total do veículo, incluindo semi-reboque e carga (kg)

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

λ = resistência ao rolamento (assumida como 0,01 para todos os veículos)

v = velocidade instantânea (m/s)

C_D = coeficiente de arrasto aerodinâmico (assumido como 0,6 para todos os veículos)

ρ = densidade do ar (1,25 kg/m³)

A_f = área frontal do veículo (assumido como 10 m² para todos os veículos)

a = aceleração instantânea (m/s²)

θ = declive da estrada

Assim, no caso de a potência utilizada em cada segundo exceder a potência máxima da viatura de substituição em estudo, é recalculada uma nova aceleração para a viatura de substituição tendo em conta a sua potência máxima (neste caso a “potência utilizada” toma o valor da potência máxima do veículo e é calculado o valor da aceleração correspondente a essa potência).

Este valor de aceleração é sempre inferior à aceleração original, cuja viatura tinha mais potência, e pode ser positiva, quando o veículo não tem potência para acelerar da mesma forma que o veículo que originalmente fez a viagem, pode ser nula, caso o veículo tenha

atingido a velocidade máxima que a sua potência permite ou pode até ser negativa, caso a potência máxima não seja sequer suficiente para manter a velocidade (este caso verifica-se quando há um aumento súbito de declive, especialmente depois de uma descida em que o veículo atingiu velocidades mais elevadas).

Ao usar esta ferramenta resultam diferentes distribuições temporais de STP para as diferentes viaturas que, ao serem combinadas com as respetivas curvas de consumo, servem para estimar o consumo que cada viatura faria na viagem em estudo (assumindo que eram conduzidas da mesma forma), ficando assim com uma estimativa de qual a viatura indicada para esse serviço (baseada no critério de menor consumo) e de qual a poupança possível de obter com a correta alocação de viaturas.

A Figura 16 apresenta um exemplo com as diferentes dinâmicas resultantes para as diferentes potências, quando se utiliza uma viatura de 440 cv e quando se simula o comportamento das viaturas de menor potência (420, 400 e 330 cv).

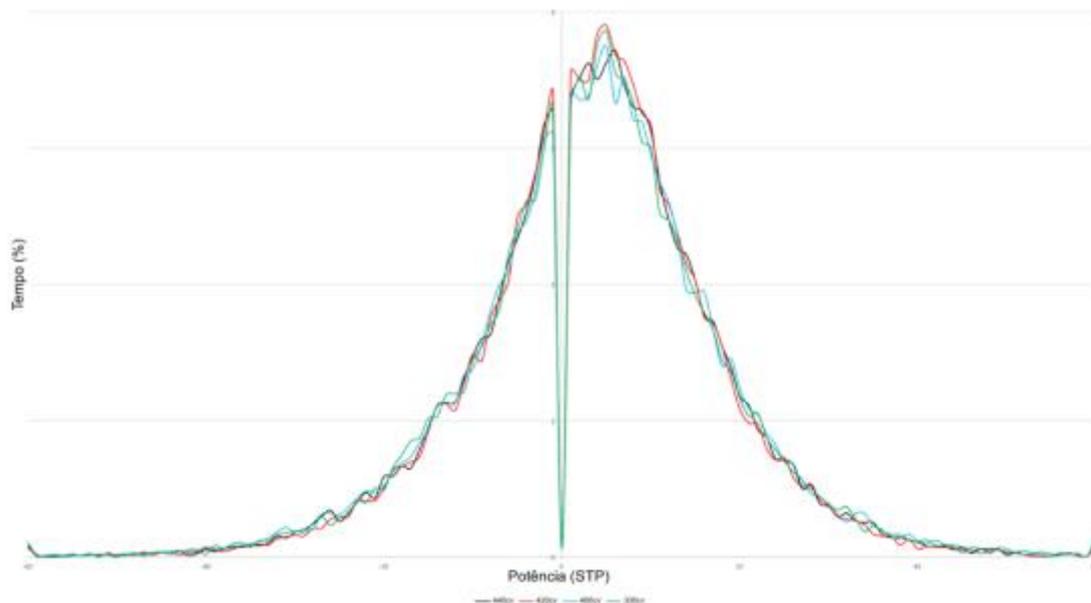


Figura 16 - Exemplo do ajuste da dinâmica de uma viagem baseado na potência das diferentes viaturas: 330 cv (verde), 400 cv (azul), 420 cv (vermelho) e 440 cv (preto).

Ao usar esta metodologia para todas as viagens e para todas as viaturas disponíveis é possível estimar o consumo que qualquer uma das viaturas disponíveis faria em qualquer viagem. Assim, para n viaturas disponíveis e r viagens a realizar, tem-se que o número total de distribuições possíveis P , é dado pela expressão:

$$P(n, r) = \frac{n!}{(n-r)!} \quad (\text{Eq. 9})$$

em que $n \geq r$.

Ao comparar os somatórios dos consumos de todas as r viagens para cada distribuição P possível e sem repetir viaturas, consegue-se encontrar a distribuição ideal, que é aquela que apresenta o menor consumo total na soma dos consumos de todas as r viagens. A este algoritmo de otimização combinatória dá-se o nome de algoritmo húngaro [77]. Ao comparar este consumo mínimo com o consumo real é possível estimar o potencial de redução do consumo de combustível através da alocação de viaturas. De seguida, na Tabela 9 apresenta-se um exemplo da aplicação desta metodologia para um conjunto de 3 serviços (A, B e C) e 3 veículos (1, 2 e 3):

Tabela 9 - Exemplo de um conjunto de 3 viagens e os consumos estimados para 3 viaturas distintas

	Consumos viatura 1 (kg)	Consumos viatura 2 (kg)	Consumos viatura 3 (kg)
Serviço A	258,2	263,5	253,6
Serviço B	277,6	282,6	271,3
Serviço C	210,3	214,2	205,6

Usando a expressão dada pela equação 9 temos, para $n=3$ e $r=3$, um valor de $P=6$. Isto significa que existem 6 distribuições possíveis de fazer para este número de veículos e viagens, como é apresentado na Tabela 10:

Tabela 10 - Distribuições possíveis e consumos associados para o exemplo da Tabela 9

Distribuição	Consumo (kg)
A1 – B2 – C3	$258,2 + 282,6 + 205,6 = 746,4$
A1 – B3 – C2	$258,2 + 271,3 + 214,2 = 743,7$
A2 – B1 – C3	$263,5 + 277,6 + 205,6 = 746,7$
A2 – B3 – C1	$263,5 + 271,3 + 210,3 = 745,1$
A3 – B1 – C2	$253,6 + 277,6 + 214,2 = 745,4$
A3 – B2 – C1	$253,6 + 282,6 + 210,3 = 746,5$

Assim resulta que a melhor distribuição é a distribuição A1 – B3 – C2, pois é aquela que apresenta o menor consumo total (743,7 kg). Assim, a viatura 1 deve ser alocada à viagem A, a viatura 3 deve ser alocada à viagem B e, finalmente, a viatura 2 deve ser usada na viagem C. Sabendo que a empresa utilizou a configuração A1-B2-C3 que apresentou um consumo de 746,4 litros, a mudança para a configuração ideal resultaria numa redução de consumo de 2,7 kg, ou seja, numa redução de 0,4% do consumo.

4.3 – Metodologia para a quantificação dos impactes da eco-condução associada à alocação de viaturas

Ao combinar ambas as ferramentas descritas anteriormente (para a eco-condução e para a alocação de viaturas) é possível contabilizar o efeito de ambas as medidas em simultâneo na

redução do consumo de combustível. Assim, a ferramenta permite identificar e corrigir todas as incidências em que o comportamento do condutor não se insere dentro dos limites estipulados, contabilizando assim o efeito da eco-condução. Ao mesmo tempo, a potência utilizada pela viatura é verificada a cada segundo e caso a potência exceda o valor máximo da viatura de substituição em estudo, a dinâmica é corrigida de forma a não exceder essa potência, permitindo assim simular o comportamento de viaturas distintas. Tudo isto tem como resultado uma dinâmica de condução corrigida, ajustada à potência de cada viatura disponível, que permite estimar o consumo que cada uma das viaturas disponíveis faria em determinada viagem, contabilizando os efeitos da eco-condução. Mais uma vez, as viaturas disponíveis são distribuídas pelas viagens a realizar para que o somatório dos consumos seja o menor possível. Esse consumo resultante é então comparado com o consumo total original e são estimadas as melhorias resultantes da aplicação destas medidas de eficiência energética.

4.4 – Metodologia para a quantificação dos impactes ambientais

Uma vez calculados os impactes energéticos das diferentes medidas, nomeadamente a eco-condução, a alocação de viaturas e o uso de viaturas movidas a gás natural é possível estimar o impacte ambiental dessas mesmas medidas. Para isso são usados os fatores de emissão apresentados na Tabela 11 e na Tabela 12, relativos às emissões de CO₂, CO, NO_x, PM e THC (do inglês *Total Hydrocarbon*, indicando que o metano é contabilizado), poluentes resultantes da queima de gasóleo e de gás natural.

Tabela 11 - Fatores de emissão de CO₂ [12]

Emissão (kg/kg combustível)	
Gasóleo	3,14
Gás Natural	2,75

Tabela 12 - Fatores de emissão de THC [78], CO, NO_x e PM [12]

Poluente	Veículo	Mínimo (g/kg combustível)	Médio (g/kg combustível)	Máximo (g/kg combustível)
THC	Gasóleo	1,33	1,92	3,77
	Gás Natural	2,60	3,23	3,33
CO	Gasóleo	5,73	7,58	10,57
	Gás Natural	2,20	5,70	15,00
NO_x	Gasóleo	28,34	33,37	38,29
	Gás Natural	5,50	13,00	30,00
PM	Gasóleo	0,61	0,94	1,57
	Gás Natural	0,01	0,02	0,04

Assim, uma vez calculados os impactes energéticos resultantes das medidas descritas anteriormente, é possível obter uma estimativa da quantidade de poluentes que se evita emitir para a atmosfera através da implementação de medidas de eco-condução e/ou da alocação de viaturas. Sabendo os fatores de emissão do gasóleo e do gás natural é ainda possível fazer uma comparação entre as duas tecnologias, identificando, para cada poluente, qual das tecnologias realiza maiores e menores emissões.

5 – Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a metodologia desenvolvida, nomeadamente os resultados do processo de caracterização das viaturas e validação do método, os impactes energéticos e ambientais das medidas de eco-condução e alocação de viaturas, quer separadamente, quer o seu efeito combinado e finalmente é apresentado o estudo ambiental da viatura movida a GNL.

5.1 – Validação da ferramenta e resultados da caracterização

De forma a atingir os objetivos propostos, as viagens realizadas foram analisadas e, para cada viatura, foram agrupados todos os pares de viagens possíveis de combinar e com isso foram estimadas todas as curvas de consumo características possíveis de obter. Cada uma dessas curvas de consumo foi usada para estimar os consumos das viagens que não foram usadas para obter essa mesma curva, como forma de calcular os desvios das estimativas de consumos e assim selecionar as melhores curvas, bem como validar a ferramenta. Os resultados apresentam-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Viagens realizadas com as diferentes viaturas

Viagem	Duração	% $(|\text{declive}| > 4\%)$	Pares de viagens usados para a caracterização e estimativa do consumo (% desvio entre consumo medido e consumo estimado)		
			(1/2)	(1/3)	(2/3)
Viagens realizadas com a viatura 1					
1	4h06min	41,9	0	0	-12,1
2	3h59min	49,7	0	5,8	0
3	7h39min	19,2	-6,3	0	0
Desvio médio			-4,2		
Desvio padrão			7,5		
Viagens realizadas com a viatura 2					
1	4h12min	45,2	0	0	-6,1
2	4h01min	52,9	0	6,3	0
3	8h04min	45,7	-5,1	0	0
Desvio médio			-1,6		
Desvio padrão			5,6		
Viagens realizadas com a viatura 3					
1	4h13min	40,1	0	0	-1,9
2	4h09min	44,9	0	7,5	0
3	4h04min	52,8	2,6	0	0
Desvio médio			2,7		
Desvio padrão			3,8		
Viagens realizadas com a viatura 5					
1	4h02min	21,9	0	0	-5,1
2	3h49min	18,7	0	5,2	0
3	4h11min	45,0	7,9	0	0
Desvio médio			2,7		
Desvio padrão			5,6		
Viagens realizadas com a viatura 7					
1	3h04min	43,1	0	0	-6,7
2	3h49min	34,4	0	7,2	0
3	2h15min	52,6	9,7	0	0

Desvio médio	3,4
Desvio padrão	7,2

Como se pode verificar, os pares de viagens cujas curvas de consumo resultantes apresentam menores desvios, são frequentemente pares que contêm as viagens mais longas ou as viagens com maiores declives. Estas são viagens que apresentam grande incidência nas gamas de potência altas, indicando que viagens cujas distribuições modais de STP apresentem quantidades de pontos significativas nos modos mais altos fornecem curvas de consumo mais precisas. A Tabela 14 apresenta o caso da viatura 8, movida a gás natural e com um método de abastecimento distinto, que pode induzir em erros e que não se verifica nas viaturas a gasóleo.

Tabela 14 - Viagens realizadas com a viatura 8

Viagem	Duração	% ($|declive| > 4\%$)	Pares de viagens usados para a caracterização e estimativa do consumo (% desvio entre consumo medido e consumo estimado)					
			(1/2)	(1/3)	(1/4)	(2/3)	(2/4)	(3/4)
1	4h30min	43,1	0	0	0	-145,1	-170,5	-156,4
2	1h54min	34,4	0	31,3	-29,4	0	0	-2,0
3	1h31min	52,6	-28,5	0	-29,2	0	5,0	0
4	4h20min	43,1	33,5	69,0	0	5,2	0	0
Desvio médio (%)			2,5	50,2	-29,3	-70,0	-82,8	-79,2
Desvio padrão (%)			31,0	18,9	0,1	75,2	87,8	77,2

No caso do veículo movido a GNL, o melhor par de viagens para caracterização é o par 1-4 que é composto pelas duas viagens mais longas realizadas com esta viatura. Este par apresenta as estimativas mais consistentes, apresentando o menor desvio padrão, apesar de o desvio médio não ser o menor. Isto deve-se ao facto de o reservatório de gás natural deste veículo se encontrar pressurizado sendo assim necessário garantir que a pressão interna se mantenha dentro dos limites estabelecidos.

Assim, quando o veículo é ligado ao posto de abastecimento para encher o depósito, a bomba começa primeiro por extrair a fase gasosa de combustível que se encontra no depósito, de forma a que o gás liquefeito que será adicionado posteriormente não force a fase gasosa a comprimir e assim aumentar a pressão interna do depósito. A consequência deste procedimento é que, ao medir a massa de gás natural liquefeito que foi abastecida, estamos a contabilizar o combustível consumido pelo veículo, mas estamos também a contabilizar a porção de combustível que foi extraída pela bomba de abastecimento. Esta porção faz com que o consumo do veículo seja sobrestimado, levando a valores de consumo maiores que aqueles que foram efetivamente realizados pelo veículo. Assim, de forma a minimizar o erro introduzido pelo combustível que foi extraído durante o abastecimento, devem-se seleccionar viagens mais longas de forma a que a fração de combustível removido pela bomba seja o menor possível, resultando assim um valor de consumo mais próximo daquele que foi efetivamente usado pelo motor de combustão interna do veículo. Ao seleccionar o par de viagens 1-4 para a caracterização do veículo resulta uma curva de consumo menos sobrestimada, o que faz com que, ao usar essa curva de consumo para estimar os consumos das viagens 2 e 3, se obtenham valores estimados mais baixos que aqueles que foram medidos nas viagens 2 e 3, o que é coerente com aquilo que seria esperado, uma vez que as

viagens 2 e 3, mais curtas, apresentam consumos mais sobrestimados, pois para viagens mais curtas o efeito do gás natural extraído no abastecimento no aumento do consumo medido é maior.

A Figura 17 mostra o abastecimento da viatura a GNL onde é possível observar a mangueira de extração da fase gasosa à direita (mais fina e coberta de gelo que se forma devido às baixas temperaturas) e a mangueira de abastecimento da fase líquida à esquerda (mais larga).



Figura 17 - Exemplo do abastecimento da viatura a gás natural

Uma vez concluído o processo de validação da ferramenta, foram seleccionados os pares de viagens cujas curvas de consumo resultantes forneceram estimativas com menores desvios. Assim, os coeficientes característicos de cada viatura apresentam-se na Tabela 15:

Tabela 15– Resultados da caracterização das viaturas

		Veículo							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Coeficiente	A (g/s)	3,12	3,30	3,26	2,95	3,96	2,47	2,49	3,45
	B (g/s) $\frac{1}{(sKW)^2}$	2,13E-03	1,96E-03	1,79E-03	2,13E-03	1,53E-03	2,20E-03	2,27E-03	1,60E-03
	C (g/s) $\frac{1}{sKW}$	8,47E-02	7,99E-02	7,17E-02	8,67E-02	6,13E-02	8,72E-02	8,95E-02	6,33E-02
	D (g/s)	3,97E+00	4,10E+00	3,98E+00	3,81E+00	4,57E+00	3,34	3,39	4,08
	E (g/s) $\frac{1}{sKW}$	1,70E-01	1,60E-01	1,43E-01	1,73E-01	1,23E-01	1,74E-01	1,79E-01	1,27E-01
	F (g/s)	3,12E+00	3,30E+00	3,26E+00	2,95E+00	3,96E+00	2,47E+00	2,49E+00	3,45E+00

Como se pode verificar, todos os coeficientes apresentam a mesma ordem de grandeza para os veículos estudados. A Figura 18 apresenta as curvas de consumo das viaturas resultantes do processo de caracterização das mesmas.

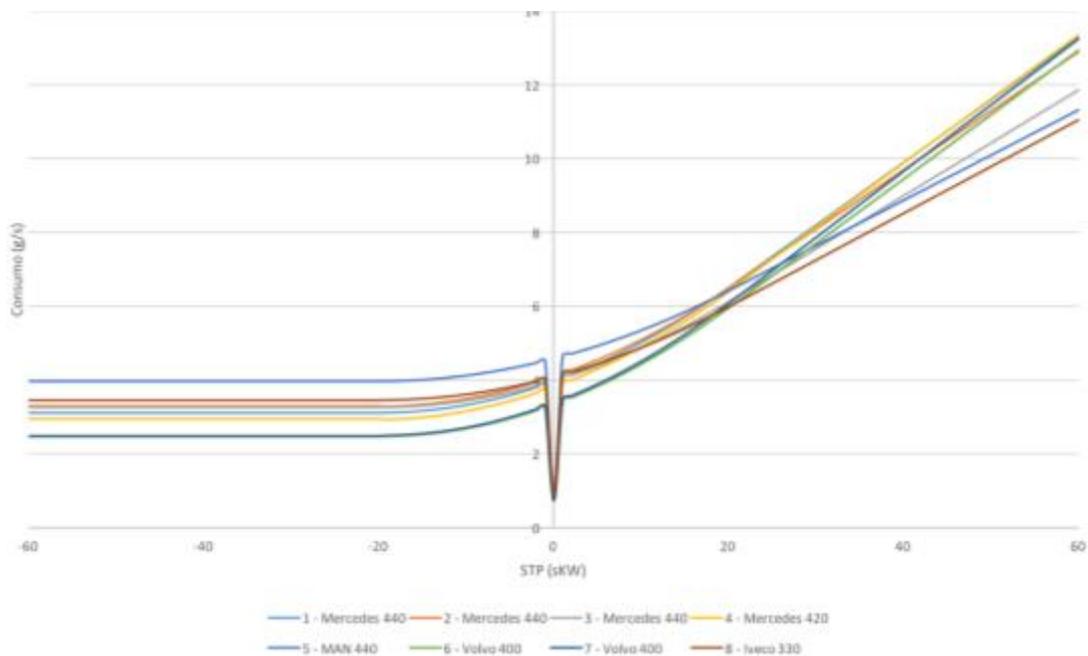


Figura 18 - Curvas de consumo de todas as viaturas caracterizadas

Como se pode verificar, as viaturas menos potentes apresentam consumos mais baixos nas gamas de potências mais elevadas. Isto deve-se ao facto de os veículos menos potentes trabalharem mais tempo sujeitos a cargas mais altas onde a eficiência é maior.

De notar ainda que o veículo 5, que apresenta uma potência igual à dos veículos 1,2 e 3, apresenta uma curva de consumo distinta das curvas destes veículos. Isto deve-se ao facto de este método relacionar a potência usada e os consumos efetuados para obter as curvas de consumo dos veículos. No entanto, um condutor menos experiente como o do veículo 5, pode passar mais tempo com caixa de velocidades engrenada numa relação errada, submetendo o motor a demasiada rotação (relação engrenada abaixo da ideal) ou a demasiada carga (relação engrenada acima da ideal), fazendo com que o motor trabalhe longe da sua eficiência máxima, aumentando assim o consumo para a mesma potência utilizada e alterando assim o formato da curva de consumo resultante.

A Tabela 16 apresenta os resultados da validação, apresentando os desvios obtidos para aquelas que foram as viagens usadas para a caracterização das viaturas.

Tabela 16– Resultados da validação

Veículo	Viagem	Consumo real	Consumo estimado	Desvio (%)
1	2	74,5	78,8	5,8
2	3	158,0	149,9	-5,1
3	1	82,0	80,4	-1,9
5	1	86,0	81,6	-5,1
7	1	39,0	36,4	-6,7
8	2	34,1	24,1	-29,4
8	3	38,3	27,1	-29,2
Média dos desvios				-10,2±12,6
Média do módulo dos desvios				11,9±11,1
Média dos desvios - Excluindo o veículo 8				-2,6±4,5
Média do módulo dos desvios - Excluindo o veículo 8				4,9±1,6

Como se verifica, ao usar as curvas de consumo obtidas para estimar consumos de viagens que não aquelas usadas na obtenção da respetiva curva de consumo e ao comparar essas estimativas com os consumos reais medidos, resulta um desvio médio de $-10,2\pm 12,6\%$ e uma média dos módulos dos desvios de $11,9\pm 11,1\%$, indicando que os resultados apresentam pouca exatidão e pouca precisão. No entanto, observa-se uma grande disparidade entre os desvios obtidos com o veículo 8 e os desvios obtidos com os restantes veículos. Excluindo o veículo 8, cujos elevados desvios se devem à especificidade do abastecimento deste tipo de veículo, observa-se um desvio médio de $-2,6\pm 4,5\%$, indicando uma boa exatidão na estimativa dos consumos, e uma boa precisão, como se pode verificar pela consistência do valor médio do módulo dos desvios de $4,9\pm 1,6\%$.

5.2 – Impactes das medidas de eficiência energética

Desenvolvida a metodologia descrita anteriormente, foi possível calcular os benefícios da aplicação de medidas de eficiência energética. No entanto, uma vez que a empresa distribui os condutores e viaturas por tipos de serviço a realizar e não a viagens individuais é necessário ter em atenção a forma como se analisam os impactes.

Assim, em vez de analisar os impactes para cada uma das viagens individuais que foram realizadas, os impactes são calculados para cada serviço (isto é, cada conjunto de viagens realizado por cada par “condutor/viatura”) de forma a garantir que os benefícios estimados e possíveis recomendações resultantes desta análise podem ser aplicadas à realidade da empresa.

Um exemplo prático disto é o caso em que um par “condutor/viatura” realiza duas entregas no mesmo dia. Neste caso, ao estimar o consumo realizado por cada viatura disponível de forma a decidir qual a viatura mais adequada, é necessário garantir que a viatura a escolher tem que ser a mais eficiente no somatório dessas duas viagens, uma vez que não é possível escolher a melhor viatura para a primeira viagem e a melhor viatura para a segunda viagem, pois isto implicaria ter de trocar de viatura a meio do dia de trabalho (fazer isto faria com que fosse necessário garantir que as viaturas a trocar estivessem disponíveis no mesmo local à mesma

hora, de forma minimizar o tempo despendido, o que é muito difícil de conseguir) ou então teria de ser necessário alterar o par de viagens a realizar nesse dia, o que é difícil dado que as viagens são selecionadas de forma a garantir que há tempo disponível para realizar as entregas e regressar antes de o tempo limite de condução diária do condutor ser atingido.

5.2.1 – Aplicação de eco-condução

Usando a ferramenta desenvolvida para o cálculo do impacto da implementação de medidas de eco-condução foi possível calcular as dinâmicas corrigidas, com base nas dinâmicas originais recolhidas e com base nos limites estipulados para a velocidade e aceleração instantânea máxima.

Uma vez calculadas as dinâmicas corrigidas, foi possível usar a distribuição temporal de STP de cada uma dessas dinâmicas e, em conjunto com a curva de consumo da viatura apropriada, obter uma estimativa do consumo após a implementação de eco-condução. Sabendo o consumo estimado para o caso de aplicação de eco-condução é possível compará-lo com o consumo original e assim estimar o potencial de redução de consumos através da implementação destas medidas. A Tabela 17 apresenta os resultados para os consumos originais e para os consumos estimados com eco-condução, a redução percentual dos mesmos após a implementação de eco-condução bem como o nível de experiência e formação dos condutores acompanhados, permitindo assim associar o potencial de redução de consumos com o tipo de condutor.

Tabela 17– Resultados da implementação de medidas de eco-condução

Serviço	Tipo de condutor	Tipo de percurso	Média original (l/100km)	Estimativa média eco (l/100km)	Redução de consumo (%)	Aumento duração viagem (%)
A	Alguma experiência	Azambuja - Algarve	30,0	29,1	2,9	0,1
B	Alguma experiência	Azambuja - Algarve	25,4	24,8	2,4	0,1
C	Alguma experiência	Azambuja – Grande Lisboa	25,8	25	3,2	0,2
D	Muito experiente / com formação	Azambuja - Algarve	27,0	26,9	0,5	0,0
E	Novato / Sem experiência	Azambuja - Algarve	28,1	25,5	9,3	1,2
F	Alguma experiência	Azambuja – Grande Lisboa	29,9	28,8	3,9	0,2
G	Muito experiente / com formação	Azambuja – Margem Sul	25,3	25,1	0,9	0,1
H	Alguma experiência	Azambuja – Grande Lisboa	25,2	24,8	1,6	0,2
Redução consumo média (%)					3,1±2,6	
Aumento tempo médio (%)					0,3±0,4	

Como se pode verificar há uma relação entre a experiência e formação dos condutores e o potencial de redução do consumo, com os condutores mais experientes a apresentarem consumos reais muito próximos daqueles estimados pela ferramenta de eco-condução e, conseqüentemente, a apresentar um potencial de redução de consumo baixo (para o condutor mais experiente as melhorias são inferiores a 1%). Os condutores que apresentam alguma experiência, mas cuja formação ainda não está completa, apresentam melhorias possíveis de 1,6% a 3,9%.

Foi ainda acompanhado um condutor novato que está na empresa há cerca de 3 meses e que ainda não teve qualquer tipo de formação em eco-condução, e para esse condutor a redução de consumo estimada é de 9,3%, realçando a importância da experiência e formação dos condutores nos consumos realizados. Este valor (9,3%) é muito próximo dos 9,4% que foram obtidos para condutores europeus, em ambiente real de condução e com formação semelhante à formação dada aos condutores da Transportes Paulo Duarte [54].

Em média, para as viagens realizadas, a implementação de medidas de eco-condução resulta num potencial de redução de consumos de 3,1%. De notar que a redução nos consumos é acompanhada de um aumento do tempo de viagem médio de apenas 0,3%, valor significativamente mais baixo que o valor obtido noutros estudos [79]. Isto deve-se ao facto de, nas viagens estudadas, os veículos percorrerem grandes distâncias em percurso extra-urbano

onde são percorridas longas distâncias de forma ininterrupta, ao contrário dos percursos urbanos onde há uma maior ocorrência de perturbações (como paragens em sinais vermelhos ou sinais de STOP). Assim, como os veículos realizam poucas paragens (e poucos arranques) e como os veículos estão equipados com limitadores de velocidade automáticos, há poucos eventos nos quais a ferramenta desenvolvida intervém, sendo por isso reduzido o impacto da implementação de eco-condução na duração das viagens. Além disso, os condutores acompanhados já tinham, na sua maioria, recebido alguma formação em eco-condução pelo que é normal que efeito da ferramenta de eco-condução seja limitado. Isto pode ser verificado observando o comportamento do condutor que realizou o serviço E, que é aquele que tem menor experiência e por isso é aquele cujo aumento de tempo é maior (bem como o potencial de redução do consumo). Por ser menos experiente, este condutor realiza mais comportamentos excessivos e assim a ferramenta intervém mais frequentemente, resultando assim um maior potencial de redução do consumo, mas também um maior aumento do tempo de viagem.

No entanto, para todos os condutores o potencial de redução de consumo excede largamente o aumento do tempo de viagem, mostrando que pequenas alterações no comportamento dos condutores podem resultar em poupanças significativas à custa de um aumento de tempo praticamente impercetível (0,3% de 8 horas de condução corresponde a apenas 1,5 minutos de aumento do tempo de viagem).

Esta redução observada nos consumos traduz-se nas reduções de gases poluentes sumarizadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Redução das emissões através da implementação de medidas de eco-condução

Redução do consumo (%)		3,1		
Poluente	Redução por 100 km			
	Min.	Méd.	Máx.	
CO ₂ (kg)	2,3			
CO (g)	4,2	5,5	7,7	
NO _x (g)	20,7	24,4	28,0	
THC (g)	1,0	1,4	2,8	
PM (g)	0,4	0,7	1,1	

Usando os valores médios como referência, esta redução de 3,1% nos consumos, quando aplicada a uma empresa da escala da Transportes Paulo Duarte, que possui cerca de 200 viaturas que percorrem cerca de 150000 km anuais cada, corresponde a uma redução do consumo de gasóleo de 257000 litros/ano, das emissões de CO₂ em 690 toneladas/ano, de CO em 1650 kg/ano, de NO_x em 7320 kg/ano, de hidrocarbonetos em 420 kg/ano e de partículas em 210 kg/ano.

5.2.2 – Aplicação de alocação de viaturas

Usando a metodologia desenvolvida para a quantificação dos impactes da alocação de viaturas, foi possível simular o comportamento dos diferentes veículos nos diferentes tipos de serviço, obtendo dinâmicas ajustadas às diferentes potências dos veículos, o que em conjunto com as curvas de consumo resultantes do processo de caracterização, permite estimar o consumo que cada veículo faria em cada tipo de serviço.

Com estas estimativas é possível, com recurso à ferramenta desenvolvida, estimar a melhor distribuição de viaturas pelos serviços, de forma a que a distribuição resultante seja aquela cujo consumo total (na soma de todos os serviços) apresenta o menor valor.

Assim, os consumos para os diferentes veículos em cada serviço e o aumento do tempo de viagem apresentam-se na Tabela 19. De notar que, ao contrário do consumo que pode aumentar ou diminuir dependendo do veículo, o tempo apenas pode aumentar, no caso de o veículo de substituição não ter potência suficiente para acompanhar o ciclo original. Isto deve-se ao facto de a ferramenta desenvolvida garantir que o ciclo ajustado nunca ultrapassa o original, intervindo apenas de forma a abrandá-lo, seja quando o limite de velocidade ou aceleração máximas são atingidos ou quando o veículo de substituição atinge a sua potência máxima e não consegue acompanhar o veículo original.

Tabela 19 - Consumos para as diferentes viaturas (sem o efeito da eco-condução)

Consumo real (viatura original) (kg)		Consumos estimados (kg) (viaturas de substituição)						
Serviço A								
Viatura	1	2	3	4	5	6	7	8
Consumo	258,2	263,5	253,6	250,0	283,2	223,8	227,4	256,4
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
Serviço B								
Viatura	2	1	3	4	5	6	7	8
Consumo	282,6	277,6	271,3	269,4	300,7	242,4	246,4	273,2
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
Serviço C								
Viatura	3	1	2	4	5	6	7	8
Consumo	205,6	210,3	214,2	204,1	228,1	183,5	186,5	207,1
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3
Serviço D								
Viatura	4	1	2	3	5	6	7	8
Consumo	147,4	152,4	155,8	150,1	168,1	131,7	133,8	152,0
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Serviço E								
Viatura	5	1	2	3	4	6	7	8
Consumo	156,8	146,4	148,7	142,4	142,3	128,6	130,8	142,9
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4
Serviço F								
Viatura	6	1	2	3	4	5	7	8
Consumo	78,7	91,2	93,3	90,0	88,2	101,1	79,9	91,2
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Serviço G								
Viatura	7	1	2	3	4	5	6	8
Consumo	170,5	194,8	199,3	192,2	188,3	216,0	167,9	195,0
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Serviço H								
Viatura	8	1	2	3	4	5	6	7
Consumo	256,4	258,2	263,5	253,6	250,0	283,2	223,8	227,4
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Como se pode verificar, em várias viagens é possível selecionar viaturas cujo consumo é menor que o consumo da viatura original (consumo real). No entanto apenas se pode alocar uma viatura a um tipo de serviço pelo que não é possível usar sempre a viatura ideal para todos os serviços. Há então que proceder a uma distribuição cujo somatório dos consumos nos 8 serviços seja mínimo, considerando que não pode haver viaturas repetidas. Assim, usando o algoritmo húngaro, em tudo análogo ao apresentado na Tabela 9 e na Tabela 10 resulta que a distribuição ideal é **A7-B6-C3-D2-E8-F5-G1-H4**, apresenta um aumento do tempo de viagem desprezável de 0,1% face ao tempo original e apresenta um consumo total de 1520 kg, que quando comparado com o consumo da distribuição de viaturas original A1-B2-C3-D4-E5-F6-G7-H8, que é de 1556,2 kg, resulta numa melhoria de 2,3%.

A Tabela 20 apresenta os impactes ambientais da alocação de viaturas.

Tabela 20 – Redução das emissões através da alocação de viaturas

Redução do consumo (%)		2,3		
Poluente	Redução por 100 km			
	Min.	Méd.	Máx.	
CO ₂ (kg)	1,7			
CO (g)	3,1	4,1	5,7	
NO _x (g)	15,3	18,0	20,7	
THC (g)	0,7	1,0	2,0	
PM (g)	0,3	0,5	0,8	

À semelhança do que acontece com a eco-condução, os benefícios na redução de consumos excedem largamente o aumento de tempo das viagens, mostrando que o tempo não é um fator a ter em consideração no momento de realizar a alocação de viaturas (no pior dos casos, o serviço E, em que foi acompanhado o condutor menos experiente com uma viatura com 440 cv, usar a viatura menos potente, com apenas 330 cv, resultou num aumento do tempo de viagem de apenas 0,4%). Isto deve-se ao facto de o tempo passado em potências elevadas (perto da potência máxima da viatura) ser bastante reduzido e atingido apenas em alguns casos pontuais (como em declives muito acentuados). Esta redução de 2,3%, quando aplicada à realidade da empresa, traduz-se em reduções anuais médias de 190000 litros de gasóleo consumidos, 510 toneladas de CO₂ emitidas, assim como menos 1230 kg de CO, 5400 kg de NO_x, 300 kg de hidrocarbonetos e menos 150 kg de partículas.

5.2.3 – Aplicação de eco-condução associada à alocação de viaturas

Fazendo uso de ambas as funcionalidades da ferramenta desenvolvida é possível avaliar o impacto combinado da eco-condução em conjunto com a alocação de viaturas nos consumos efetuados.

Usando os limites definidos para a velocidade e aceleração máximas (de forma a simular o efeito da eco-condução) em simultâneo com o valor da potência máxima (ajustado de acordo com o veículo em análise) é possível obter ciclos ajustados com eco-condução para cada uma das viaturas, para cada viagem.

A Tabela 21 apresenta os consumos estimados para os diferentes serviços, quando se contabiliza o efeito da eco-condução.

Tabela 21 - Consumos para as diferentes viaturas com aplicação de eco-condução

	Consumo real (viatura original) (kg)		Consumos estimados (kg) (viaturas de substituição)					
Serviço A								
Viatura	1	2	3	4	5	6	7	8
Consumo	250,7	255,3	246,2	242,8	274,2	217,7	219,3	250,1
Aumento do tempo (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Serviço B								
Viatura	2	1	3	4	5	6	7	8
Consumo	275,8	270,9	264,3	260,1	279,2	236,7	237,8	268,6
Aumento do tempo (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
Serviço C								
Viatura	3	1	2	4	5	6	7	8
Consumo	199,0	203,7	207,5	197,9	219,2	177,3	178,6	200,9
Aumento do tempo (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Serviço D								
Viatura	4	1	2	3	5	6	7	8
Consumo	146,7	151,7	149,8	149,6	167,0	131,1	132,4	151,4
Aumento do tempo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Serviço E								
Viatura	5	1	2	3	4	6	7	8
Consumo	142,2	133,4	135,2	129,7	129,5	117,9	118,4	132,3
Aumento do tempo (%)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5
Serviço F								
Viatura	6	1	2	3	4	5	7	8
Consumo	75,6	86,8	87,3	86,2	84,9	95,1	76,8	88,2
Aumento do tempo (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Serviço G								
Viatura	7	1	2	3	4	5	6	8
Consumo	169,0	193,1	197,2	190,2	186,9	213,5	166,4	193,9
Aumento do tempo (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Serviço H								
Viatura	8	1	2	3	4	5	6	7
Consumo	252,3	253,8	259,5	249,6	245,2	278,3	220,5	222,9
Aumento do tempo (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

De forma análoga ao que foi apresentado no subcapítulo 5.2.2 as viaturas foram distribuídas de forma a que o somatório total dos consumos seja mínimo, sendo que cada viatura apenas é alocada a um único serviço.

Assim, usando o algoritmo húngaro, resulta que a distribuição ideal é **A7-B4-C8-D2-E3-F5-G1-H6**, que corresponde a um consumo total de 1468,5 kg de combustível. Isto corresponde a uma redução dos consumos de 5,6% à custa de um aumento do tempo total de viagem de 0,3%.

De notar que quando se tem em consideração o efeito da eco-condução, a distribuição ideal de viaturas passa a ser diferente daquela que não contabiliza o efeito da eco-condução, indicando que, para o mesmo serviço, a experiência e nível de formação do condutor pode afetar a decisão de qual o veículo a usar. Um exemplo claro disto mesmo é o caso da alocação ideal sem eco-condução (**A7-B6-C3-D2-E8-F5-G1-H4**) na qual a viatura a 8 (que é aquela que apresenta menores consumos nas potências mais altas, como se pode verificar na Figura 18) é alocada ao serviço E, no qual foi acompanhado o condutor menos experiente, indicando que a viatura 8 é mais indicada a condutores sem formação ou menos experientes e que por isso passam mais tempo na gama de potências mais altas. De forma análoga, a viatura 2, que apresenta os maiores consumos nas gamas de potências mais altas é alocada ao serviço D, serviço no qual foi acompanhado o condutor mais experiente da empresa e que, devido a essa mesma experiência, é o condutor que menos utiliza as gamas de potência mais altas das viaturas.

A Tabela 22 apresenta os impactes ambientais da implementação de eco-condução associada à alocação de viaturas.

Tabela 22 – Redução das emissões através da implementação de medidas de eco-condução associada à alocação de viaturas

Redução do consumo (%)		5,6		
Poluente	Redução por 100 km			
	Min.	Méd.	Máx.	
CO ₂ [kg]	4,1			
CO [g]	7,5	9,9	13,8	
NO _x [g]	37,1	43,7	50,1	
THC [g]	1,7	2,5	4,9	
PM [g]	0,8	1,2	2,0	

Quando combinadas, a eco-condução e alocação de viaturas têm potencial para diminuir, em média, o consumo anual de combustível em 394000 litros de gasóleo. Anualmente, evitar-se-ia a emissão de 1230 toneladas de CO₂, de 2970 kg de CO, 13110 kg de NO_x, 720 kg de hidrocarbonetos e de 360 kg de partículas.

5.3 – Impacte ambiental de viaturas a Gás Natural

Partindo dos resultados obtidos anteriormente, é possível avaliar o impacte causado pela substituição de viaturas a gasóleo por viaturas a gás natural, quer em termos ambientais, nas emissões de poluentes, quer em termos económicos, nos custos operacionais relacionados com o consumo de combustível.

Assim, comparando a viatura a GNL com uma viatura a gasóleo média, é possível estimar as poupanças anuais em termos de consumo de combustível. Para isso é necessário definir o consumo médio efetuado pelas viaturas a gasóleo. Através da medição dos consumos das viagens analisadas foi verificado que o consumo médio efetuado pelas viaturas da Transportes Paulo Duarte é de cerca de 27,6 l/100km. O valor do consumo médio efetuado pela viatura a gás natural quando conduzida por um condutor treinado é de 24,4 kg/100km.

Sabendo que o gasóleo tem um poder calorífico inferior de cerca de 45 MJ/kg e o GNL cerca de 55MJ/kg resulta que o veículo a GNL consome cerca de 13,4 MJ/km e uma viatura a gasóleo média cerca de 10,6 MJ/km. Isto deve-se ao facto de os veículos a gasóleo apresentarem uma maior eficiência quando utilizados a carga parcial e assim apresentarem consumos mais baixos [80].

Usando os fatores de emissão de poluentes (valores médios) para o gasóleo e para o gás natural anteriormente apresentados, obtêm-se as reduções de emissões apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23– Variação das emissões de poluentes através do uso de viaturas a gás natural (comparado com uma viatura a gasóleo média)

Poluente	Variação por 100 km	Variação percentual (%)
CO₂ (kg)	-7,7	-10,4
CO (g)	-38,8	-21,8
NO_x (g)	-465,7	-59,5
THC (g)	+33,8	+75,0
PM (g)	-21,6	-97,8

Como se pode verificar, o veículo a gás natural mostra ser menos poluente que uma viatura a gasóleo em todos os gases, emitindo menos CO₂ e CO devido ao facto de o gás natural ser menos rico em carbono que o gasóleo. A menor emissão de NO_x face a uma viatura a gasóleo deve-se ao facto de rácio ar-combustível ser mais próximo da estequiometria, havendo menor concentração de oxigénio na mistura. Numa viatura a gasóleo a combustão é realizada em condições de excesso de ar, favorecendo a formação de NO_x [81]. A viatura a GNL emite ainda menos partículas que uma viatura movida a gasóleo, sendo que o único poluente cujas emissões são mais altas no veículo a GNL são os hidrocarbonetos totais (THC de *Total Hydrocarbons*) cujas emissões são 75,0% mais elevadas do que numa viatura a gasóleo. Isto deve-se, em grande parte, ao facto de este tipo de veículo recorrer a um processo de combustão estequiométrica, sendo possível, em certas situações, que não haja oxigénio suficiente para completar a combustão do metano (CH₄). Estudos indicam que se não se contabilizar o metano (NMHC de *Non-Methane Hydrocarbons*) as emissões de hidrocarbonetos nas viaturas a gás natural conseguem ser inferiores às das viaturas a gasóleo [80].

6 – Conclusões

Este trabalho teve como objetivo a avaliação dos impactes energéticos e ambientais da implementação de medidas de eficiência energética numa frota de pesados de mercadorias, baseado em dados recolhidos em ambiente real de condução, recolhidos durante a realização de um estágio na empresa Transportes Paulo Duarte, no âmbito do projeto Galp202020 que é resultado da parceria entre o Instituto Superior Técnico e a GALP ENERGIA.

Durante o verão de 2015 foram acompanhados 9 condutores (sendo que um dos condutores nunca recebeu formação em eco-condução e um deles é altamente treinado) e foram analisadas 8 viaturas, sendo que uma delas é movida a gás natural liquefeito (GNL) enquanto as restantes são movidas a gasóleo, num total de 23 viagens e 93 horas de registo de dados.

Para cumprir os objetivos propostos, foi desenvolvido um procedimento experimental para a recolha dos dados necessários com recurso a um laboratório portátil e foram desenvolvidas metodologias para o processamento desses mesmos dados, de forma a proceder à caracterização do perfil de consumo das viaturas e assim ter uma base que foi utilizada para desenvolver metodologias capazes de estimar os impactes da eco-condução, da alocação de viaturas e do efeito combinado destas medidas. Esta metodologia permitiu ainda avaliar o impacto do uso de veículos movidos a gás natural, através do estudo de uma viatura que a empresa tinha em sua posse durante a realização do estágio.

Concluiu-se que apesar de a empresa já dar formação aos seus condutores, a implementação de medidas de eco-condução, tem ainda potencial para reduzir o consumo da frota em 3,1% sem aumentar a duração das viagens de forma significativa (+0,3%). Ao aplicar este valor para toda a empresa, que possui cerca de 200 viaturas que realizam cerca de 150000 km/ano cada, obtém-se uma redução do consumo de gasóleo de cerca de 257000 litros, que a um preço de 1€/litro corresponde a uma redução de 257000€ anuais gastos em combustível. Esta redução do consumo traduz-se igualmente numa redução média das emissões de CO₂ de 690 toneladas anuais, das emissões de CO em 1650 kg/ano, de NO_x em 7320 kg/ano, de hidrocarbonetos em 420 kg/ano e das emissões de partículas em 210 kg/ano.

Com a ferramenta de alocação de viaturas, que estima o consumo que cada viatura caracterizada faria em determinada viagem e de seguida distribui as viaturas pelas viagens de forma a minimizar o consumo total realizado, conclui-se que a alocação de viaturas tem um potencial de redução de consumo de 2,3% com um aumento da duração de viagem praticamente nulo (0,1%). Anualmente, isto traduz-se numa redução do consumo de cerca de 190000 litros de combustível e 190000€ anuais. Com esta redução, as emissões de CO₂ reduzem-se em 510 toneladas anuais, as emissões de CO diminuem em 1230 kg/ano, as de NO_x em 5400 kg/ano, as de hidrocarbonetos em 300 kg/ano e as de partículas em 150 kg/ano. A ferramenta de alocação permite ainda compreender que há viaturas que são mais adequadas a determinado tipo de serviço, ou até mesmo a determinado tipo de condutor do que outras. Desta forma, observa-se que as viaturas que apresentam menores consumos nas gamas mais altas de potência são mais indicadas para condutores menos experientes que passam mais tempo nas gamas de potência mais elevadas, enquanto as viaturas que

apresentam consumos mais baixos nas gamas de potência mais baixas o são mais indicadas para condutores mais experientes, pois passam mais tempo em gamas de potência mais baixas. Esta ferramenta pode ser usada para ajudar os responsáveis da empresa durante o processo de aquisição de novas viaturas, bastando basear-se na tipologia de serviço no qual a nova viatura será usada e verificar, na frota atual da empresa, quais as viaturas que apresentam menores consumos nesse mesmo tipo de serviço de forma a saber quais as características mais adequadas para a viatura a comprar.

Quando se contabiliza o efeito combinado da eco-condução e da alocação de viaturas o potencial de redução de combustível aumenta para 5,6%, o que corresponde a uma diminuição do consumo de cerca de 394000 litros anuais e a uma poupança de quase 400 mil euros anuais em combustível. Ao verificar-se esta redução do consumo, num ano evitar-se-iam as emissões de 1230 toneladas de CO₂, assim como as emissões de 2970 kg de CO, de 13110 kg de NO_x, de 720 kg de hidrocarbonetos e de 360 kg de partículas.

No entanto, esta ferramenta é limitada pela impossibilidade de estimar consumos para viagens que ainda não tenham sido realizadas, cujos dados relativos à dinâmica de condução ainda não tenham sido recolhidos. Assim, para implementar medidas de alocação de frota é necessário proceder à recolha de várias dinâmicas de condução de viagens semelhantes de forma a desenvolver o perfil de condução típico dessa viagem para assim poder selecionar o veículo mais apropriado. É ainda necessário estudar perfis de condução que não foram estudados nesta dissertação, como condução noturna ou maioritariamente realizada em percursos citadinos. Por estes motivos, a alocação de frota ainda não foi implementada, dado que a criação destes perfis de condução típicos é um processo demorado e durante a realização do estágio na empresa apenas foi possível estudar um conjunto de 23 viagens.

A viatura movida a GNL foi também estudada e provou ser uma alternativa interessante, quer dum ponto de vista económico (ver Anexo A), apresentando um menor custo por km percorrido (0,22€/km face aos 0,28€/km numa viatura a gasóleo típica), quer dum ponto de vista ambiental, emitindo em média menos 10,4% de CO₂, menos 21,8% de CO, menos 59,5% de NO_x e menos 97,8% de partículas que uma viatura. No entanto as emissões de hidrocarbonetos são 75,0% maiores que numa viatura a gasóleo, muito devido ao metano que não é completamente queimado durante o processo de combustão. Esta viatura é, no entanto, limitada pela sua autonomia de cerca de 600 km e dada a escassez de postos de abastecimento de GNL em Portugal é necessário planear o percurso de forma a garantir que não se corre o risco de ficar sem combustível.

Assim, para além de se comprovar o potencial do gás natural liquefeito como alternativa ao gasóleo, a realização deste trabalho permitiu desenvolver um método de caracterização de viaturas pesadas de mercadorias que não necessita de equipamento dispendioso ou complexo e que consegue fornecer estimativas próximas dos valores reais. Conseguiu-se ainda reforçar a importância da eco-condução como medida de eficiência energética e provou-se que a alocação de viaturas, que é algo que ainda não é praticado, tem potencial para reduzir os consumos e emissões das frotas de pesados de mercadorias.

7 - Trabalho futuro

Após do desenvolvimento do trabalho, são identificados alguns pontos de trabalho futuro, dos quais se destacam:

- **Desenvolvimento de ferramenta comercial** - Seria ainda interessante incorporar a ferramenta desenvolvida com a base de dados da empresa (o que não foi possível durante a realização deste estágio), de forma a saber sempre quais as viaturas disponíveis e quais os serviços a efetuar, de forma a proceder à distribuição mais eficiente dum ponto de vista energético;
- **Alargamento de amostra** - De forma a tornar esta ferramenta mais precisa nas suas estimativas seria necessário proceder ao acompanhamento de mais condutores em mais viagens, de forma a aumentar a base de dados das viaturas caracterizadas e a aumentar o número de perfis de condução de forma a estimar melhor os consumos e assim poder aumentar o grau de confiança dos resultados obtidos;
- **Comparação de viaturas GNL e Diesel** - Tendo em conta que a viatura a gás natural apresenta uma cilindrada menor que a das viaturas a gasóleo (7,8 litros face aos 12,0 litros das viaturas a gasóleo) e uma menor potência (330 cv contra os 400 a 440 cv das viaturas a gasóleo) seria interessante comparar a viatura a gás natural com uma viatura a gasóleo com potência semelhante, de forma a comparar os seus consumos e emissões e perceber como se comparam quando a diferença de potência é menor e de forma a compreender melhor se as boas prestações que a viatura a GNL apresentou neste estudo se devem à menor cilindrada e potência (uma vez que ao ter menor potência e cilindrada, a viatura a gás natural funciona mais tempo em cargas altas onde a eficiência é maior [81]); e
- **Estudar outros perfis de condução** - Seria ainda interessante estudar perfis de condução maioritariamente citadina ou perfis de condução noturnos, de forma a compreender o efeito do tráfego na condução e consumos e integrar esses resultados na ferramenta e código desenvolvidos, de forma a poder indicar a hora a que a viagem em análise se iria realizar e ajustar os cálculos da forma adequada.

Bibliografia

- [1] T. R. Karl, "Modern global climate change," *Science*, 5 dezembro 2003.
- [2] EEA, "Pocketbook 2012," 2013. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/doc/2012/pocketbook2012.pdf>. [Acedido em 23 fevereiro 2016].
- [3] Eurostat, "Freight transport statistics," [Online]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Freight_transport_statistics_-_modal_split. [Acedido em 12 fevereiro 2016].
- [4] EEA, "Pocketbook 2015," 2016. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/doc/2015/pocketbook2015.pdf>. [Acedido em 7 maio 2016].
- [5] K. Boriboonsomsin, "Reducing the carbon footprint of freight movement through eco-driving programs for heavy-duty trucks," National Center for Sustainable Transportation, 2015.
- [6] L. Boodlal e K. Chiang, "Study of the Impact of a Telematics System on Safe and Fuel-Efficient Driving in Trucks," 2014.
- [7] H. Chaari e E. Ballot, Fuel consumption assessment in delivery tours to develop eco driving behaviour, 2012.
- [8] ECOpoint Inc, "Diesel emission standards," [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>. [Acedido em 12 novembro 2015].
- [9] The Keystone Group, The impact of a newer fleet, Chicago, IL, 2010.
- [10] A. Boretti e C. Grummisch, "World's first 100% LPG long haul truck conversion," em *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, vol. 189, Springer.
- [11] A. J. Krupnick, "Energy, greenhouse gas, and economic implications of natural gas trucks," 2010.
- [12] L. Ntziachristos e Z. Samaras, "EMEP / EEA emission inventory guidebook 2013 update Sept 2014," 2014.
- [13] J. Rosenfeld e M. D. Jackson, Life-cycle cost model and pollutant emissions estimator: Greenhouse gas and criteria pollutant emissions estimator, Cupertino, CA: TIAX, 2008.
- [14] A. J. McMichael, R. E. Woodruff e S. Hales, "Climate change and human health: present and future risks," *The Lancet Global Health*, vol. 367, pp. 859-869, 2006.
- [15] "pordata.pt," [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Portugal/Pre%C3%A7os+m%C3%A9dios+de+venda+ao+p%C3%BAblico+dos+combust%C3%ADveis+l%C3%ADquidos+e+gasosos+%E2%80%93+Continente-1265>. [Acedido em 17 janeiro 2016].
- [16] EEA, "Pocketbook 2014," 2015. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/doc/2014/pocketbook2014.pdf>. [Acedido em 23 Fevereiro 2016].
- [17] Board on Energy and Environmental Systems, "Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of medium- and heavy-duty vehicles.," The National Academy Press,

Washington, DC, 2001.

- [18] A. Wahlberg, "Long term effects of training in economical driving: fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback," em *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 37, 2007, pp. 333-343.
- [19] F. Alam e H. Chowdhury, "A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck," *5th BSME International Conference on Thermal Engineering*, vol. 56, pp. 201-205, 2013.
- [20] K. R. Cooper, *Commercial vehicle aerodynamic drag reduction: historical perspective as a guide*, Ottawa, Canada, 2004.
- [21] M. Hammache, M. Michaelian e F. Browand, *Aerodynamic forces on truck models, including two trucks in tandem*, 2001.
- [22] O. Franzese, *Effect of wide-based single tires on class-8 combination truck fuel efficiency*, 2009.
- [23] C. Bradley, S. Nelson e M. T. N. America, *Truck tires and rolling resistance*, 2009.
- [24] D. Schuring, *A new look at the definition of tire rolling loss*, 1977.
- [25] EPA, *Weight reduction: A glance at clean freight strategies*, 2004.
- [26] C. Brodrick, *Evaluation of fuel cell auxiliary power units for heavy-duty diesel trucks*, vol. 7, *Transportation Research Part D*, 2002.
- [27] N. Lutsey e C.-J. Brodrick, "Heavy-duty truck idling characteristics: results from a nationwide truck survey," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014.
- [28] L. Davis, "Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow," *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 69, 4 junho 2004.
- [29] T. Ivens, "Predictive cruise control for heavy duty vehicles," 2010.
- [30] N. Kohut, F. Borrelli e K. Hedrick, "Integrating traffic data and model predictive cruise control to improve fuel economy," 2-4 setembro 2009.
- [31] S. Bennet, "Smart routing to save fuel," *Light & Medium Truck Magazine*, agosto 2008.
- [32] TIAX, Inc, "Assessment of fuel economy technologies for medium- and heavy-duty vehicles," em *Final Report to the National Academy of Sciences*, Lexington, MA, 2009.
- [33] MAN Bus, "MAN," 2016. [Online]. Available: <http://www.bus.man.eu/global/en/city-buses/man-lions-city-hybrid/overview/Overview.html>. [Acedido em 3 abril 2016].
- [34] A. Gilbert e R. Gunn, "Natural Gas Hybrid Electric Bus," 1991.
- [35] C. Olikara, J. Steiber e S. Shahed, "Analysis of a Hybrid Powertrain for Heavy Duty Trucks," *SAE Technical Paper*, 1995.
- [36] A. Lasson, N. Berg e B. Jansson, "New Hybrid Electric Distribution Truck," 1997.
- [37] J. L. Alves, "Avaliação experimental do perfil de consumo de energia de veículos eléctricos".

- [38] T. Muster, "Fuel savings potential and costs considerations for US class 8 heavy duty trucks through resistance reductions and improved propulsion technologies until 2020," MIT Energy Laboratory, 2000.
- [39] J. W. Jackson, "Testing the efficiency of a series hybrid drivetrain for agricultural applications," 2015.
- [40] E. Boer, "Zero emission trucks. An overview of state-of-the-art technologies and their potential," 2013.
- [41] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, "Hydrogen Filling Stations Worldwide," [Online]. Available: <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx?Continent=EU&StationID=-1>. [Acedido em 4 abril 2016].
- [42] H. Eichseder, *Wasserstoff in der fahrzeugtechnik*, Springer, 2012.
- [43] NANUPOT, *Potenziale effizienter nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen straßengüterverkehr bis 2050*, 2009.
- [44] J. Ming, *Adapting of a fuel cell engine to existing fuel cell hybrid vehicle*, IEEE, 2006.
- [45] Autoteileplus, "Autoteileplus," 30 Novembro 2012. [Online]. Available: [http://www.autoteileplus.de/lkw-sattelzugmaschinen-markt/Rahmen-Chassis- /-Tank/ersatzteile.html](http://www.autoteileplus.de/lkw-sattelzugmaschinen-markt/Rahmen-Chassis-/-Tank/ersatzteile.html). [Acedido em 23 Fevereiro 2016].
- [46] UTC Power, "utcpower.com," 2012 Dezembro 21. [Online]. Available: http://www.utcpower.com/files/pressreleases/PureMotion%20-%2010k%20release%20-%20Final%208_11.pdf . [Acedido em 23 Fevereiro 2016].
- [47] Northwest Natural Gas, "nwnatural.com," 2016. [Online]. Available: <https://www.nwnatural.com/Business/BenefitsOfGas/NaturalGasFleets>. [Acedido em 3 Março 2016].
- [48] Dourogás, "Postos GNV," 2016. [Online]. Available: <http://www.dourogasgnv.pt/postos/>. [Acedido em 14 Abril 2016].
- [49] European Commission, "Good Practice Examples - Appendix D LNG Blue Corridors Project Fact Sheet," 2016.
- [50] Maisgasolina, "Mapas de postos de abastecimento em Portugal," 2016. [Online]. Available: <https://www.maisgasolina.com/mapa-de-postos/>. [Acedido em 12 abril 2016].
- [51] European Commission, "LNG Blue Corridors - LNG stations in europe," 2016. [Online]. Available: <http://lngbc.eu>. [Acedido em 12 abril 2016].
- [52] A. Parkes e N. Reed, "Fuel efficiency training in a full-mission truck simulator," em *Proceeding of the Fifteenth Seminar on Behavioural Research in Road Safety*, Londres, 2005.
- [53] M. A. Symmons e G. Rose, "Ecodriving training delivers substantial fuel savings for heavy vehicle drivers," *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2009.

- [54] B. Beusen e T. Denys, "Report on Monitoring Pilot Actions," Energy Intelligent Europe, 2010.
- [55] SmartDrive Systems Inc., "Fuel Efficiency Study: Commercial Transportation," 2001. [Online]. Available: http://www.smartdrive.net/documents/smartdrive-trucking-fuel-study_2011.pdf. [Acedido em 17 abril 2016].
- [56] B. JN, "Eco-Driving: An Overlooked Climate Change Initiative," *Energy Policy*, vol. 38, pp. 762-769, 2010.
- [57] Fleetboard, "fleetboard.com," [Online]. Available: <https://www.fleetboard.com/static/index.html>. [Acedido em 23 Fevereiro 2016].
- [58] K. Shinpo, "Japanese eco-driving initiatives," em *International Agency Workshop in Eco-Driving*, Paris, França, 2007.
- [59] ISUZU, "Isuzu holds Fuel Economy Challenge," [Online]. Available: http://fleetowner.com/management/isuzu_fuel_economy_1221. [Acedido em 17 Abril 2016].
- [60] UD Trucks, "Creating Eco-Drivers and Saving Fuel Consumption," [Online]. Available: <http://www.udtrucks.com/en-au/about-us/environmental-care/the-customer>. [Acedido em 18 Abril 2016].
- [61] R. Smit, "Development and performance of a new vehicle emissions and fuel consumption software (PΔP) with a high resolution in time and space," em *Atmospheric Pollution Research*, vol. 4, 2013, pp. 336-345.
- [62] R. Smit e L. Ntziachristos, "COPERT Australia: Developing improved average speed vehicle emission algorithms for the Australian fleet," em *19th International Transport and Air Pollution Conference*, Thessaloniki, Grécia, 2012.
- [63] Transportation Research Board, Modeling MOBILE-source emissions, 2000.
- [64] HBEFA, "HBEFA," 10 Outubro 2015. [Online]. Available: <http://www.hbefa.net/e/index.html>. [Acedido em 4 abril 2016].
- [65] M. André, "The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions," *Science of the Total Environment*, Vols. %1 de %2334-335, pp. 73-84, 2004.
- [66] Graz University of Technology, "Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3".
- [67] UC Riverside, "Center for Environmental Research & Technology," [Online]. Available: <http://www.cert.ucr.edu/cmern/>.
- [68] J. Yun, "Study of the driving cycle for heavy duty trucks in hilly terrain and its effects on calculated emissions, and comparison of two mobile emission models," 2012.
- [69] R. Giannelli, "Heavy-duty diesel vehicle fuel consumption modeling based on road load and power train parameters," 2005.
- [70] G. Duarte, "A methodology to estimate vehicle fuel consumption and pollutant emissions in real-world driving based on certification data," 2013.

- [71] H. Frey, "Road grade measurement using in-vehicle, stand alone GPS with barometric altimeter," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 6, pp. 605-611, 2013.
- [72] EPA, "MOVES2010 Highway Vehicle - Population and Activity Data," 2010.
- [73] Amazon, 2016. [Online]. Available: <https://www.amazon.ca/Garmin-Barometric-Electronic-Discontinued-Manufacturer/dp/B000CSQRYS>. [Acedido em 12 abril 2016].
- [74] Cachapuz, "Cachapuz: Ponte - Básculas," 2016. [Online]. Available: <http://www.cachapuz.com/pt/categoria.asp?startAt=2&categoryID=819>. [Acedido em 12 Abril 2016].
- [75] H. Frey, H. Zhai, N. M. Rouphail, T. L. Farias e G. A. Gonçalves, "Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implications for emissions," em *Transportation Research Part D*, Elsevier, 2007, pp. 281-291.
- [76] H. Frey e P.-Y. Kuo, "Real-world energy use and emission rates for idling long-haul trucks and selected idle reduction technologies," *Journal of the Air & Waste Management Association*, 24 janeiro 2012.
- [77] H. Kuhn, "The Hungarian Method for the Assignment Problem," *Naval Search Logistics Quarterly* 2, 1955.
- [78] H. Kristensen, "Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines," 2012.
- [79] M. Barth e K. Boriboonsomsin, "Energy and Emission Impacts of a Freeway-Based Dynamic Eco-Driving System," *Transportation Research Part D*, 2009.
- [80] M J Bradley & Associates, "Comparison of Modern CNG, Diesel and Diesel Hybrid-Electric Transit Buses: Efficiency & Environmental Performance," 2013.
- [81] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill Inc., 1988.

ANEXOS

ANEXO A – Análise economia ao veículo a gás natural

Ao contrário da análise do impacto ambiental do veículo a gás natural, a análise económica é mais sensível pois depende de fatores difíceis de prever como o preço dos combustíveis.

Já é sabido que a viatura a gás natural apresenta consumos mais baixos (em kg de gás por distância percorrida) que a viatura a gasóleo média (em litros de gasóleo por distância percorrida) e atualmente o kg de gás natural apresenta um custo menor que o litro de gasóleo. No entanto, dado que a viatura a gás natural é significativamente mais cara que uma viatura a gasóleo – cerca de 40 000 € - é necessário que a diferença entre o preço dos combustíveis seja elevada o suficiente para o investimento compensar, ou seja, apresentar um Valor Atual Líquido (VAL) positivo.

Assim, para uma quilometragem anual de 150 000 km e com as médias de 27.6 l/100km para uma viatura a gasóleo e de 24.4 kg/100km para uma viatura a gás natural (correspondentes a um custo médio de 0,22€/km para uma viatura a GNL e 0,28€/km para uma viatura a gasóleo média), as poupanças anuais em combustível são as apresentadas na Tabela A1:

Tabela A1 – Poupança anual em combustível ao usar uma viatura a gás natural

Diferença entre o preço dos combustíveis ("preço litro de gasóleo – preço do kg de GNL") (€)	Poupança anual em combustível com a viatura a GNL (€/ano)
0,08	7728
0,10	8460
0,12	9192
0,14	9924

Assim considerando um investimento inicial de 40 000 € (o investimento extra necessário para adquirir uma viatura a gás natural em vez de uma a gasóleo) e um tempo de vida de 6 anos ou 900 000 km, os resultados da análise da viabilidade do investimento apresentando-se na Tabela A2.

Tabela A2 – Resultados da viabilidade do investimento para diversos valores da diferença de preço entre os combustíveis e um investimento inicial de 40000€

Diferença entre os preços dos combustíveis (€)	Tempo de retorno do investimento (anos)	Valor Atual Líquido ¹ (€)			Taxa Interna de Rentabilidade ² (%)
		a uma taxa de atualização de 5%	a uma taxa de atualização de 7,5%	a uma taxa de atualização de 10%	
0,08	5,1	-500	-3 500	-6 100	4,6
0,10	4,7	3 000	-200	-3 000	7,3
0,12	4,3	6 500	3 000	-100	9,9
0,14	4,0	10 000	6 300	3 000	12,5

1-Valor Atual Líquido. Indica o valor atual dos cash-flows futuros e é por isso usado para avaliar a viabilidade de um investimento. Este valor quer-se positivo e quanto mais alto melhor.

2-Taxa interna de rentabilidade. É a taxa de atualização (TA) que no final do tempo de vida do investimento causa VAL=0. Este valor quer-se maior que a taxa de atualização de forma a obter VAL>0 e assim a taxa de rentabilidade do investimento supera o custo de oportunidade do capital fazendo com que o projeto seja economicamente viável

Como se pode ver, dependendo do diferencial de preço do gás natural face ao preço do gasóleo, é possível que o investimento não compense, como se pode verificar pelos valores negativos do Valor Atual Líquido.

Este é um fator que pode levar potenciais interessados a afastarem-se desta tecnologia, pelo menos por enquanto, quando a tecnologia ainda é muito cara e recente e as empresas ainda não sabem se a aquisição destas viaturas é economicamente viável.

Com o passar do tempo e amadurecer da tecnologia é expectável que o preço deste tipo de viaturas baixe, passando a apresentar um preço mais próximo do custo de uma viatura a gasóleo. Assim os resultados para um investimento inicial de 20 000 € são apresentados na Tabela A3:

Tabela A3 – Resultados da viabilidade do investimento para diversos valores da diferença de preço entre os combustíveis e um investimento inicial de 20000€

Diferença entre os preços dos combustíveis (€)	Tempo de retorno do investimento (anos)	Valor Atual Líquido ¹ (€)			Taxa Interna de Rentabilidade ² (%)
		a uma taxa de atualização de 5%	a uma taxa de atualização de 7,5%	a uma taxa de atualização de 10%	
0,08	2,6	19500	16 500	13 900	31,1
0,10	2,4	23 000	19 800	17 000	35,5
0,12	2,2	26 500	23 000	19 900	39,6
0,14	2,0	30 000	26 300	23 000	43,7

Como se pode verificar neste caso, no caso de uma redução da diferença entre o custo dos veículos para metade do valor atual, o investimento nesta tecnologia apresenta-se muito atrativo dum ponto de vista económico, como atestam os resultados obtidos para o VAL.