

Avaliação Energética de um Sistema de Gestão de Propulsão de Veículos Híbridos Plug-In

Miguel Alexandre Calha Campino
Licenciado em Engenharia Mecânica

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Especialista Nuno Paulo Ferreira Henriques
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri:

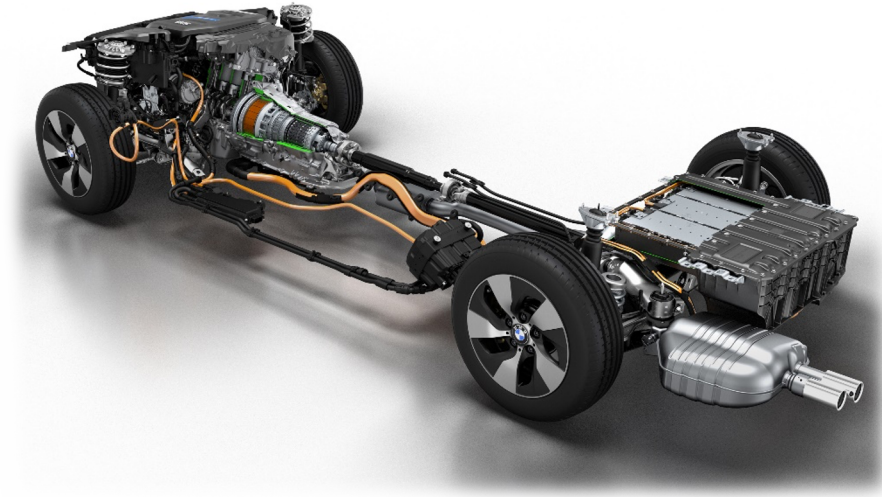
Presidente:

Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais:

Doutora Patrícia de Carvalho Baptista
Especialista Nuno Paulo Ferreira Henriques

Março de 2021



Avaliação Energética de um Sistema de Gestão de Propulsão de Veículos Híbridos Plug-In

Miguel Alexandre Calha Campino
Licenciado em Engenharia Mecânica

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Especialista Nuno Paulo Ferreira Henriques
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri:

Presidente:

Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais:

Doutora Patrícia de Carvalho Baptista
Especialista Nuno Paulo Ferreira Henriques

Março de 2021

Página deixada propositadamente em branco

*“O primeiro dever da inteligência
É desconfiar dela mesma”
Albert Einstein*

Página deixada propositadamente em branco

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos orientadores, o Professor Nuno Henriques e o Professor Gonçalo Duarte, por esta sugestão de tema, por todo o apoio dado nesta longa caminhada, por toda a disponibilidade oferecida, pela excelente orientação e motivação ao longo destes meses.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer aos meus pais e ao meu irmão por todo o suporte que me garantiram ao longo de toda a minha vida e todo o apoio que me deram durante esta jornada de cinco anos.

Em terceiro lugar, gostaria de agradecer à minha namorada, Margarida Fernandes, por todo apoio incondicional nos momentos mais difíceis, paciência e aconselhamento ao longo desta jornada.

Em quarto lugar, gostaria de agradecer ao David Martinho, ao Diogo Gouveia e à Margarida Reis pela presença constante ao longo destes cinco anos de faculdade, tendo sido um suporte fundamental para as conquistas conseguidas.

Em último lugar, deixar um agradecimento geral a todos os familiares, amigos e conhecidos que me apoiaram durante este período e acreditaram no meu sucesso.

Página deixada propositalmente em branco

Resumo

Os veículos híbridos Plug-in estão a começar a ganhar cada mais relevância no mercado automóvel, apesar de a complexidade inerente ao seu sistema de gestão de propulsão e a influência dos hábitos de carregamento dos utilizadores dificultarem a antecipação dos impactos energéticos e das suas emissões da sua utilização em ambiente real.

O presente trabalho desenvolve um método genérico capaz de prever a variação do estado de carga da bateria como também estimar os diferentes modos de propulsão solicitados pelo veículo híbrido Plug-in em cada instante, tendo apenas por base dados dinâmicos medidos em ciclos de condução reais. Através da análise dos dados recolhidos, torna-se possível criar regras capazes de indicar o modo de propulsão, aferindo em cada instante a fonte energética em uso, individualmente ou de forma combinada, durante a fase de descarregamento da bateria. Posteriormente estima-se com base no método desenvolvido (Método ABCD) o consumo combustível e eletricidade, as emissões de gases poluentes e a proporção de distância percorrida em modo elétrico relativo à distância total (*Utility Factor*), sendo comparado com os resultados reais e a estimativa obtida através do Método VSP Padrão. Ainda assim, por forma a verificar a capacidade de adaptação do método desenvolvido (Método ABCD) aplicou-se o mesmo a cinquenta ciclos de condução de diferentes tipologias (Urbano, Misto e Extraurbano) e compararam-se os resultados com os resultados obtidos através do Método VSP Padrão.

Os resultados obtidos permitiram obter, de uma forma geral, excelentes correlações entre a estimativa e a medição do estado de carga da bateria ($R^2 > 0.99$) como também se obteve com base no método desenvolvido uma estimativa dos modos de propulsão com um acerto médio de 82,2% do período de *Charge Depleting* do ciclo de condução em estudo.

Conclui-se então que o método desenvolvido, independentemente do ciclo de teste, demonstrou possuir um excelente desempenho, conseguindo equiparar-se ao desempenho do Método VSP Padrão, sendo por vezes mais exato que este, acrescentando ainda, informação sobre a gestão das fontes de propulsão, somente a partir de informação dinâmica.

Palavras-Chaves: PHEV, Estado de Carga da Bateria, Tipo de Propulsão, Gestão Energética, Emissão de Gases, *Utility Factor*.

Página deixada propositalmente em branco

Abstract

Plug-in hybrid vehicles are starting to gain more and more relevance in the automotive market, despite the complexity inherent in their propulsion management system and the influence of users' charging habits, making it difficult to anticipate energy impacts and emissions when exposed to a real environment.

The present work develops a generic method capable of predicting the variation of the state of charge as well as estimating the different modes of propulsion requested by the plug-in hybrid vehicle at each instant, based only on dynamic data measured in real driving cycles. Through the analysis of the collected data, it becomes possible to create rules capable of indicating the mode of propulsion, checking in each moment the energy source in use, individually or in combination, during the battery discharge phase. Subsequently, based on the developed method (ABCD method) it is estimated the fuel and electricity consumption, the emissions of polluting gases and the proportion of distance traveled in electric mode relative to the total distance (Utility Factor), being compared with the actual results and the estimate obtained using the Standard VSP Method. Even so, in order to verify the adaptability of the developed method (ABCD Method) the same was applied to fifty driving cycles of different types (Urban, Mixed and Extra-urban) and the results were compared with the results obtained through the Standard VSP method.

The results obtained made it possible to get, in general, excellent correlations between the estimate of the state of charge and the state of actual charge ($R^2 > 0.99$) as it was also obtained based on the developed method an estimate of the propulsion modes with a correct answer average of 82.2% of the Charge Depleting period of the driving cycle under study.

It is concluded that the developed method, being this one of a generic character, demonstrated to have an excellent performance, managing to match the performance of the Standard VSP method, being sometimes more accurate than this, adding even more information about the management of the sources of propulsion, only from dynamic information.

Keywords: PHEV, State of Charge, Type of Propulsion, Energy Management, Gas Emission, *Utility Factor*.

Página deixada propositadamente em branco

Nomenclatura

AER	All Eletric Range
CO ₂	Dióxido de Carbono
CD	Charge Depleting
CO	Monóxido de Carbono
CS	Charge Sustaining
DP	Programação Dinâmica
ECMS	Estratégias de consumo mínimo equivalente
EF	Fator Equivalente
EV	Veículo elétrico
FUF	<i>Utility Factor</i> de frota
GPS	Sistema de posicionamento global
HC	Hidrocarbonetos
ICE	Motor de combustão interna
IUF	<i>Utility Factor</i> singular
JRC	Joint Research Center
MAW	Moving Average Window
MOVES	Motor Vehicle Emissions Simulator
NO _x	Óxido Nítrico
OBD	On-board Diagnostic

PB	Power Binning
PEMS	Sistema de medição de emissões portátil
PHEV	Veículo elétrico híbrido plug-in
PMP	Princípio Mínimo de Pontryagin's
ppm	Partes por milhão
RDE	Real Driving Emissions
rpm	Rotações por minuto
SAE	Society of Automotive Engineers
SDP	Stochastic Dynamic Programming
SOC	Estado de Carga da Bateria
SUV	Sport Utility Vehicle
UE	União Europeia
UF	<i>Utility Factor</i>
VSP	Vehicle Specific Power
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure

Lista de Símbolos

a	Aceleração do veículo
A	Área frontal do veículo
$A.h_{final}$	Capacidade de Carga ao fim do regime CS
$A.h_{inicial}$	Capacidade de Carga ao início do regime CS
b_{CD}	Coefficiente linear da reta tendência, durante o regime de CD
b_{CS}	Coefficiente linear da reta tendência, durante o regime de CS
C_D	Coefficiente de arrasto
C_R	Coefficiente de atrito entre o veículo e o solo
CCF	Consumo de combustível fóssil
CEE	Consumo de energia elétrica
d_{CD}	Distância Percorrida durante o regime de CD
d_{CS}	Distância Percorrida durante o regime de CS
d_{total}	Distância total do ciclo de condução
E	Energia consumida durante o regime de CD
E_{fuel}	Energia gerada pela massa de combustível consumida
EP	Emissões de Gases Poluentes
$F_{aerodynamics}$	Resistência Aerodinâmica
$F_{internal}$	Resistência Interna

$F_{rolling}$	Resistência de Arrasto
g	Constante gravitacional
$g_{fuel_{CD}}$	Massa de Combustível consumida durante o regime de CD
$g_{fuel_{CS}}$	Massa de Combustível consumida durante o regime de CS
$g_{gas_{CD}}$	Massa de Gás emitida durante o regime de CD
$g_{gas_{CS}}$	Massa de Gás emitida durante o regime de CS
g_{gas}/km_{CD}	Massa de Gás emitida durante o regime de CD em cada km
g_{gas}/km_{CS}	Massa de Gás emitida durante o regime de CS em cada km
$grade$	Relação entre a altitude e a distância percorrida
h	Altitude
KE	Energia Cinética
$kWh/100km_{CD}$	Energia consumida em 100 km durante o regime de CD
$L/100km_{CD}$	Volume de Combustível consumido em 100 km durante o regime de CD
$L/100km_{CS}$	Volume de Combustível consumido em 100 km durante o regime de CS
m	Massa do Veículo
m_{CD}	Declive da reta tendência, durante o regime de CD
m_{CS}	Declive da reta tendência, durante o regime de CS
m_{fuel}	Massa Total de Combustível Consumida

NEC	Net Energy Change (Variação de Energia em CS)
PCI	Poder Calorífico Inferior
PE	Energia Potencial
SOC_{final}	Estado de Carga da Bateria no fim do regime CS
$SOC_{inicial}$	Estado de Carga da Bateria no início do regime CS
SOC_k	Estado de carga da Bateria no instante de tempo k
SOC_{k-1}	Estado de carga no da Bateria instante de tempo k-1
t_{CD}	Instante de tempo final do regime de CD
t_{CS}	Instante de tempo final do regime de CS
$UF(R_{CD})$	<i>Utility Factor</i> baseado no alcance elétrico do regime de CD
v	Velocidade do Veículo
$V_{sistema}$	Tensão do sistema quando atinge o regime de CS
VSP_k	VSP no instante de tempo k
v_w	Velocidade do Vento
ΔSOC_{CD}	Energia consumida durante o regime de CD
ΔSOC_{CS}	Energia consumida durante o regime de CS
ε_i	Fator de massa
ρ_a	Densidade do ar exterior
ρ_{fuel}	Densidade do Combustível

Página deixada propositalmente em branco

Índice

Capítulo 1 - Introdução e Objetivos.....	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Motivação.....	4
1.3 - Estado de Arte	5
1.4 – Objetivos.....	18
1.5 - Estrutura da Dissertação.....	19
Capítulo 2 – Metodologia	21
2.1 – Recolha de Dados	21
2.1.1 – Veículos.....	21
2.1.2 – Ciclos de Condução.....	22
2.1.3 – Sistema de Monitorização de Emissões Portátil (PEMS)	23
2.2 – Análise de dados e métodos desenvolvidos.....	24
2.2.1 – Análise de dados com recurso ao método VSP.....	25
2.2.2 – Método Indireto de Previsão do Consumo de Energia Elétrica	28
2.2.3 – Método Indireto de Predição do Sistema de Propulsão	28
2.2.4 – Estimativa do Consumo Energético e das Emissões dos Gases Poluentes	28
2.2.5 – Avaliação do <i>Utility Factor</i>	28
2.2.3 – Método Indireto de Predição do Sistema de Propulsão	33
2.2.4 – Estimativa do Consumo Energético e das Emissões dos Gases Poluentes	39
2.2.5 – Avaliação do <i>Utility Factor</i>	43
Capítulo 3 – Resultados e Aplicações.....	47
3.1 – Estimativa do Consumo Elétrico	47
3.1.1 – Veículo A	47
3.1.2 – Veículo B	55

3.2 – Diferenciação por zonas (impactos ao nível do consumo e emissões).....	62
3.2.1 – Veículo A	63
3.2.2 – Veículo B	77
3.3 – Aplicação dos Métodos em Perfis de Velocidade Aleatórios.....	90
3.3.1 – Veículo A	91
3.3.2 – Veículo B	95
Capítulo 4 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	99
Capítulo 5 – Referências Bibliográficas.....	101
Anexos	107
Anexo I – Artigos Científicos redigidos com base na presente Tese Final de Mestrado	108

Índice de Figuras

<i>Figura 1- Concentração de CO₂ ao longo do tempo; [3]</i>	1
<i>Figura 2- Emissões de CO₂ por setor, em todo o mundo;[4]</i>	2
<i>Figura 3- Taxa de emissão de gases com efeito de estufa associada aos diferentes meios de transporte; [5]</i>	2
<i>Figura 4- Componentes e processo de funcionamento de um PEMS;[13]</i>	6
<i>Figura 5- Diferentes fases associadas à realização de um teste em condições de condução real;[16]</i>	7
<i>Figura 6- Ilustração dos tipos de veículos híbridos de acordo com o tipo de gestão entre o motor térmico e elétrico;[23]</i>	10
<i>Figura 7-Ilustração do tipo de veículos híbridos de acordo com a arquitetura de carregamento;[23]</i>	10
<i>Figura 8- Representação ilustrativa da aplicação das diferentes regras no sistemas de gestão de energia; a)AER focused; b) componente térmica dominante; c) componente elétrica dominante;[24]</i>	12
<i>Figura 9- Diagrama de blocos simplificado e regras difusas presentes no controlador de lógica difusa aplicado a veículo híbrido plug-in;[25]</i>	13
<i>Figura 10- Estrutura da Rede Neuronal;[30]</i>	17
<i>Figura 11- Ilustração dos elementos necessário para possibilitar a recolha de dados;</i>	21
<i>Figura 12-Percurso realizado durante os ensaios efetuados;[38]</i>	22
<i>Figura 13-Exemplo de um ciclo de testes realizado, dividido em três fases (urbano, autoestrada, urbano). a) Velocidade e Altitude em função do tempo; b) Velocidade e rotação do motor em função do tempo;</i>	23
<i>Figura 14-Componentes principais do PEMS instalados nos veículos;[37]</i>	24

Figura 15- Representação esquemática da metodologia VSP atual utilizada para estimar o consumo e emissões;[42]	27
Figura 16-Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação (Consumo, Regeneração e Ausência de Consumo e Regeneração de Energia Elétrica);.....	32
<i>Figura 17-Zonas que caracterizam em cada instante a gestão do sistema de propulsão (0- Desligado;1- Ligado);</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18- Primeiro critério de validação do ciclo de condução;[44]</i>	<i>44</i>
Figura 19-Segundo critério de validação do ciclo de condução;[37]	44
<i>Figura 20-Variação do SOC medido durante a viagem 1 e 2, com a respectiva identificação do termino do regime de CD e inicio do regime de CS;</i>	<i>48</i>
<i>Figura 21- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o método indireto, regime de CD. a) RPM = 0; b) RPM ≠ 0);</i>	<i>49</i>
<i>Figura 22- Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação no veículo A (Consumo, Regeneração e Ausência de Consumo e Regeneração de Energia Elétrica);</i>	<i>49</i>
<i>Figura 23- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método Indireto, regime de CD);</i>	<i>50</i>
<i>Figura 24- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do método indireto para as duas viagens realizadas (regime de CD);</i>	<i>51</i>
<i>Figura 25- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o Método VSP Padrão;.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 26- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CD);</i>	<i>52</i>

<i>Figura 27- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD);</i>	53
<i>Figura 28-Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, regime CS;</i>	54
<i>Figura 29- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CS);</i>	54
<i>Figura 30- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD);</i>	55
<i>Figura 31-Variação do SOC medido durante a viagem 1 e 2, com a respectiva identificação do termino do regime de CD e inicio do regime de CS;</i>	56
<i>Figura 32- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o método indireto, regime de CD. a) RPM = 0; b) RPM ≠ 0);</i>	56
<i>Figura 33- Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação (Consumo, Regeneração e Ausência de Consumo e Regeneração de Energia Elétrica);</i>	57
<i>Figura 34- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método Indireto, regime de CD);</i>	58
<i>Figura 35- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do método indireto para as duas viagens realizadas (regime de CD);</i>	58
<i>Figura 36- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o Método VSP Padrão;</i>	59
<i>Figura 37- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CD);</i>	60
<i>Figura 38- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD);</i>	60

<i>Figura 39-Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, regime CS;</i>	61
<i>Figura 40- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CS);</i>	61
<i>Figura 41- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado para as duas viagens realizadas;</i>	62
<i>Figura 42-Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação específicas para Veículo A (Zona A, Zona B, Zona C e Zona D);</i>	63
<i>Figura 43- Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3);</i>	65
<i>Figura 44-Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3);</i>	65
<i>Figura 45- Comparação do consumo de combustível ao longo do tempo entre os diferentes métodos de estimativa e a realidade (Veículo A);</i>	67
<i>Figura 46- Aproximação do SOC em diferentes viagens baseado em diferentes abordagens (Veículo A);</i>	69
<i>Figura 47-Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método ABCD e do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD, Veículo A);</i>	69
<i>Figura 48- Curvas de Variação de SOC que caracterizam cada método utilizado (Veículo A);</i>	76
<i>Figura 49-Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação (Zona A, Zona B, Zona C e Zona D);</i>	77
<i>Figura 50- Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3);</i>	79

<i>Figura 51-Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3);</i>	79
Figura 52- Comparação do consumo de combustível ao longo do tempo entre os diferentes métodos de estimativa e a realidade (Veículo B);	81
<i>Figura 53- Aproximação do SOC em diferentes viagens baseado em diferentes abordagens (Veículo B);</i>	83
<i>Figura 54-Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método ABCD e do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD, Veículo B);</i>	83
Figura 55- Curvas de Variação de SOC que caracterizam cada método utilizado (Veículo B).	89
Figura 56- Consumo médio de Combustível obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);	91
Figura 57- Consumo médio de eletricidade obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);	91
Figura 58- Emissão de CO_2 obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);	92
Figura 59- Emissão de CO obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão, (Veículo A);	92
Figura 60- Emissão de HC obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);	93
Figura 61- Emissão de NO_x obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);	93
Figura 62- Utility Factor obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);	94

Figura 63- Comparação da curva WLTP com a curva criada através dos resultados obtidos com o Método ABCD e o Método VSP Padrão; (Veículo A)	94
Figura 64- Consumo médio de Combustível obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);.....	95
Figura 65- Consumo médio de eletricidade obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);	95
Figura 66- Emissão de <i>CO2</i> obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);	96
Figura 67- Emissão de <i>CO</i> obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão, (Veículo B);	96
Figura 68- Emissão de <i>HC</i> obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);	97
Figura 69- Emissão de <i>NOx</i> obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);.....	97
Figura 70- Utility Factor obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);	97
Figura 71- Comparação da curva WLTP com a curva criada através dos resultados obtidos com o Método ABCD e o Método VSP Padrão; (Veículo B)	98

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1- Características dos veículos em estudos;</i>	22
<i>Tabela 2- Modos do Vehicle Specific Power; [41]</i>	26
<i>Tabela 3- Resumo da análise comparativa entre o Método VSP Padrão, Método ABCD e a realidade;</i>	28
<i>Tabela 4- Condições limite que caracterizam cada modo de propulsão (Dados Reais); ...</i>	36
<i>Tabela 5-Condições limite que caracterizam cada modo de propulsão (Algoritmo ABCD);</i>	37
<i>Tabela 6- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 1, Veículo A);</i>	64
<i>Tabela 7- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 2, Veículo A);</i>	64
<i>Tabela 8- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);</i>	66
<i>Tabela 9- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);</i>	67
<i>Tabela 10- Comparação do consumo de energia elétrica entre as diferentes abordagens (Veículo A);</i>	68
<i>Tabela 11- Comparação da emissão de CO₂ entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);</i>	70
<i>Tabela 12- Comparação da emissão de CO₂ entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);</i>	71
<i>Tabela 13- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);</i>	71

<i>Tabela 14- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 15- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 16- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 17- Comparação da emissão de NOx entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 18- Comparação da emissão de NOx entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 19-Comparação do Utility Factor de acordo com o método utilizado e os critérios de validação associações (Veículo A);</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 20- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 1, Veículo B);</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 21- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 2, Veículo B);</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 22- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 23- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 24- Comparação do consumo de energia elétrica entre as diferentes abordagens (Veículo B);</i>	<i>82</i>
<i>Tabela 25- Comparação da emissão de CO2 entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);</i>	<i>84</i>

<i>Tabela 26- Comparação da emissão de CO₂ entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 27- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 28- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 29- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 30- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 31- Comparação da emissão de NO_x entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 32- Comparação da emissão de NO_x entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 33-Comparação do Utility Factor de acordo com o método utilizado e os critérios de validação associações (Veículo B);</i>	<i>89</i>

Página deixada propositalmente em branco

Capítulo 1 - Introdução e Objetivos

1.1 - Introdução

As alterações climáticas são um dos maiores desafios presentes na atualidade, mais especificamente, encontrando-se associados a um aumento da temperatura média do planeta em cerca de 1°C [1], desde o tempo pré-industrial, o que se traduz numa maior taxa de ocorrência de eventos climáticos extremos (inundações, secas, tempestades), elevação do nível das águas do mar, alteração do crescimento das produções agrícolas e deterioração das condições de vida da humanidade, a nível ambiental ou mesmo da saúde do organismo [2].

Estas alterações climáticas são consequência das emissões de gases com efeito de estufa, mais especificamente a emissão de dióxido de carbono (CO_2), sendo que a concentração deste gás na atmosfera atingiu os níveis mais elevados da história, que pela primeira vez em 800 mil anos foi além das 300 ppm, como também já ascendeu além das 400 ppm [3], como é demonstrado na Figura 1.

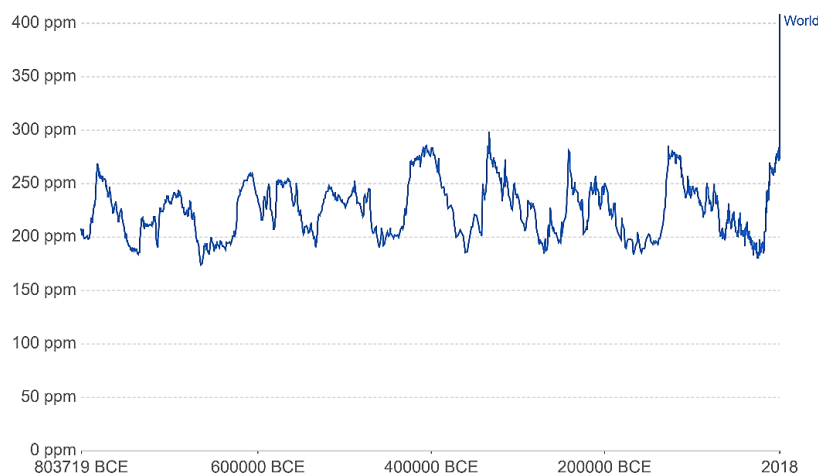


Figura 1- Concentração de CO_2 ao longo do tempo; [3]

As emissões de CO_2 têm-se vindo a intensificar desde a revolução industrial, devido à queima de combustíveis fósseis. Os setores de produção de eletricidade e calor (40%), dos transportes (20%) e da indústria (20%), são responsáveis por aproximadamente 80% do CO_2 emitido globalmente [4], como é verificado na Figura 2. Torna-se assim necessário o desenvolvimento de diversas medidas específicas para cada setor com o objetivo de reduzir a emissão de CO_2 para atmosfera.

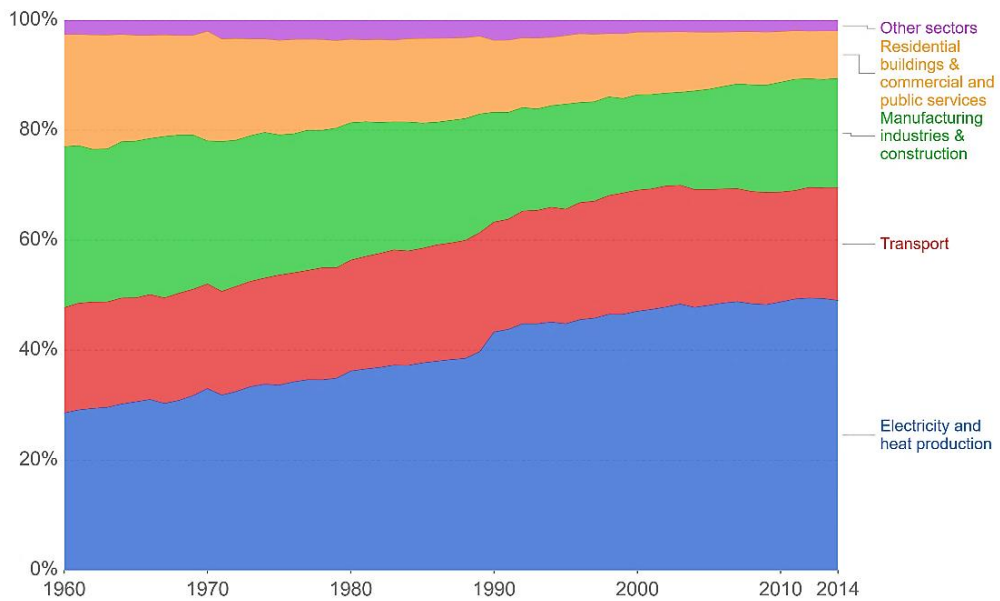


Figura 2- Emissões de CO₂ por setor, em todo o mundo;[4]

Focando no setor dos transportes, mais especificamente dos transportes terrestres, estes são responsáveis por 72% das emissões de gases com efeito de estufa, maioritariamente CO₂, sendo esta taxa relativa à totalidade das emissões de gases com efeito de estufa praticada pelo setor dos transportes [5], como é verificado na Figura 3.

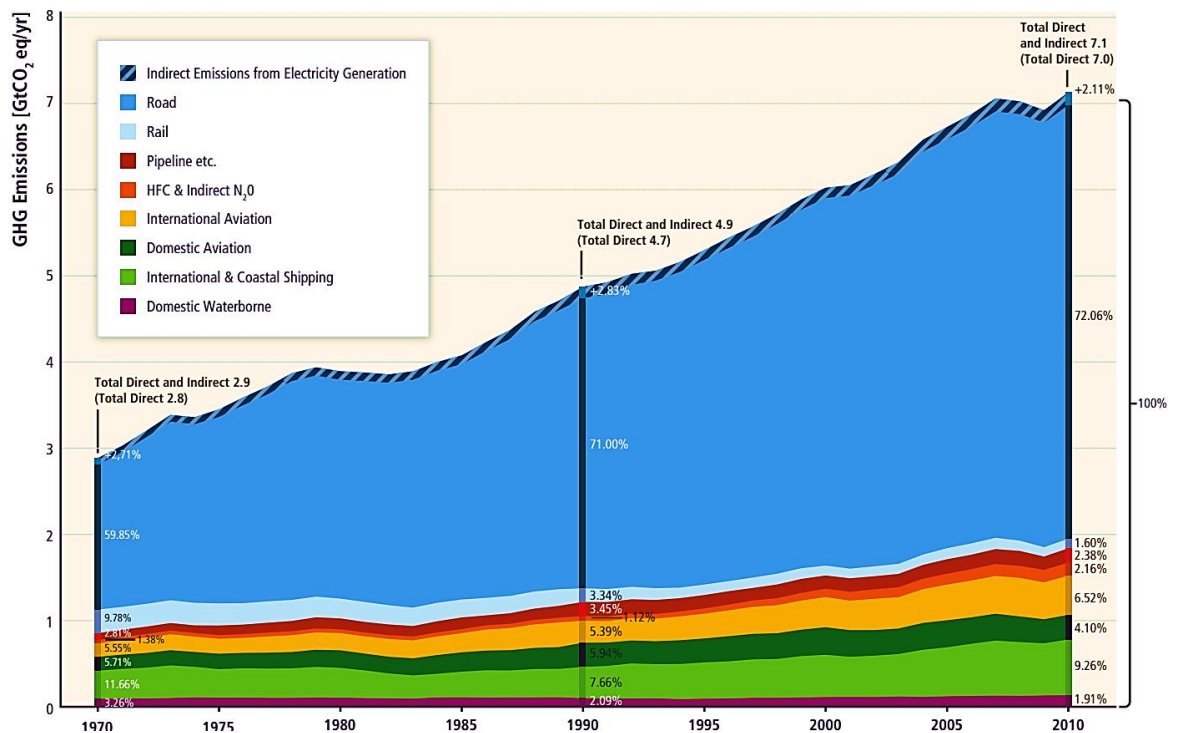


Figura 3- Taxa de emissão de gases com efeito de estufa associada aos diferentes meios de transporte; [5]

Face a este panorama, têm sido implementadas diversas medidas legislativas, desde o protocolo de Quioto, que proporcionaram o condicionamento do nível das emissões de gases com efeito de estufa, embora, desde 2015, em virtude do acordo de Paris, verifica-se uma preocupação mais assídua relativamente à emissão de CO_2 , principalmente na Europa, no qual se decretou um limite para os veículos ligeiros comercializados de $130 \text{ g}_{CO_2}/\text{km}$, estando previsto para 2021 o limite ser alterado para apenas $95 \text{ g}_{CO_2}/\text{km}$ de acordo com o Regulamento (UE) 2019/631 [6]. Ainda assim e de acordo com este mesmo regulamento, prevêem-se alterações futuras face aos objetivos descritos para 2025 e 2030 no qual se pretende uma redução das emissões de CO_2 de 15% e 37,5% [6], respetivamente, face aos valores regulamentados.

O cumprimento destes objetivos é fundamental para alcançar a neutralidade carbónica prevista para 2050, pelo que se verifica de acordo com a comunidade europeia, a necessidade de atuar em áreas prioritárias, sendo de enaltecer, o aumento da eficiência dos sistemas de transportes, retirando o máximo proveito das tecnologias digitais e “smart pricing”, fomentar a implantação de energias alternativas de baixa emissão, como por exemplo biocombustíveis avançados, hidrogénio e combustíveis sintéticos renováveis e por último incentivar ao desenvolvimento de tecnologias que possibilitam a criação de veículos com baixas emissões ou nulas, através de um motor térmico mais desenvolvido, sistemas de controlo de emissões mais sofisticados ou então a eletrificação do veículo de forma parcial (Híbrido) ou de forma total (Elétrico)[7].

Analisando em particular o funcionamento de um veículo híbrido, verifica-se que é uma solução interessante, na medida em que permite a otimização do sistema de propulsão e a redução das emissões devido ao complemento do motor elétrico com um motor térmico permitindo manter o motor térmico a funcionar em condições de maior eficiência, ou então, inibir o funcionamento do mesmo em situações de condução em carga estabilizada e de pouca necessidade de potência. Com o desenvolver da tecnologia em questão, foram criados diferentes tipos de veículos híbridos, podendo ser diferenciados na forma como é feita a gestão entre o uso do motor elétrico e o motor térmico (híbrido paralelo/híbrido série/híbrido misto), mas também na forma como se procede ao carregamento da bateria (híbrido convencional/ híbrido plug-in).

Nestes termos e em consequência da introdução de novas normas para a certificação de veículos na Europa [8], que recorrem à monitorização do consumo de combustível e de energia elétrica em condições reais de utilização (Real Driving Emission), a quantificação dos fluxos de energia (combustível e eletricidade ambas provenientes de fontes externas ao veículo) num veículo plug-in é crucial, de forma a atribuir os reais impactos energéticos e emissões associadas à sua utilização. Contudo, apesar da monitorização do consumo de combustível em estrada, em condições reais de utilização, que está atualmente bem definido em termos metodológicos e de equipamentos a utilizar [9] a monitorização do consumo elétrico implica cuidados específicos (magnitude da tensão e corrente envolvidas) quer na instalação de equipamentos adequados quer nos cuidados a ter de forma a garantir a segurança do técnico responsável pela monitorização. Assim sendo, existe a necessidade de procurar abordagens mais simples, mais seguras e com a capacidade de se adaptarem à gestão das fontes energéticas (térmica e elétrica), face a combater o impacto no consumo e nas emissões provocado pelo funcionamento alternado/conjunto das fontes de propulsão que as metodologias atualmente utilizadas não são capazes de detetar com exatidão.

1.2 - Motivação

O desenvolvimento do presente documento, deve-se a uma empatia pessoal relativamente ao mundo tecnológico agregado ao setor automóvel. Desde sempre, demonstrei possuir uma atitude que me despertou uma certa curiosidade, relativamente ao funcionamento das “coisas”, o que me leva a ser um grande adepto de engenharia inversa.

Aplicado ao tema em causa, a avaliação energética de um sistema de gestão de propulsão de veículos híbridos plug-in e respetivos sistemas de climatização, estão unidos dois fatores que me despertam interesse, sendo a tecnologia em si e a forma como esta é empregue na atualidade, isto é, a alternância entre as duas fontes de energia, reúne as condições para um funcionamento otimizado, o que proporciona efeitos significativos em termos da redução do consumo de combustíveis fósseis, mas também na redução das emissões de gases com efeito de estufa. Esta tipologia de veículos pode ser identificada como os veículos do presente, face às limitações legislativas, mas também enquanto não existem as condições necessárias para a utilização generalizada de veículos elétricos devido à falta de estações de carregamentos e ao elevado tempo associado.

Nestes termos, o presente documento é uma abordagem que explora esta tecnologia mantendo sempre a sua simplicidade na forma como se tudo processa, demonstrando o meu carácter pessoal de engenheiro, sendo que cada fenómeno tem a sua explicação, não olhando para o problema como se tratasse de uma caixa negra, mas sim um acontecimento com continuidade no tempo e no espaço.

1.3 - Estado de Arte

Para solucionar os problemas relativos às dificuldades inerentes à gestão das fontes energéticas de um veículo híbrido plug-in, existe a necessidade de compreender as abordagens atualmente utilizadas para a recolha e análise de dados, as diferentes tecnologias associadas a um veículo híbrido e as estratégias que influenciam a escolha da fonte de energia de acordo com as condições às quais o veículo está exposto.

Com a introdução do Regulamento (UE) 2017/1151, definiram-se novas regras para a certificação de veículos na União Europeia, mais propriamente, a implementação do “Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure” (WLTP) e o “Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle” (WLTC) [10]. Apesar do ciclo de testes ser baseado em padrões característicos dos diferentes continentes, ainda existem algumas preocupações relativamente à diferença entre as emissões provenientes de um veículo exposto a condições reais e um veículo exposto a um ciclo de testes [11]. Face a este paradigma e de modo a limitar o uso de estratégias ilegais, a União Europeia ainda adicionou ao Regulamento (UE) 2017/1151, a obrigatoriedade de realizar testes de condução em condições reais de utilização (Real Driving Emissions), no qual descreve as regras para o mesmo, onde enaltece que o veículo deve estar equipado com um sistema de medição de emissões portátil (PEMS) [10]. Embora, apenas em 2018, com a submissão do Regulamento (EU) 2018/1832, onde foi executada a correção e introdução de novos conceitos relativamente ao Regulamento (EU) 2017/1151, se introduziu os equipamentos a aplicar quando existe a necessidade de monitorização do consumo de combustível e de energia elétrica em condições reais [8] de um veículo híbrido.

Para avaliar o desempenho de um veículo híbrido plug-in em condições de condução reais, é necessário controlar o nível de emissão de gases poluentes e os consumos energéticos do veículo [12], sendo que, para o efeito é utilizado um PEMS com a capacidade de medir o

fluxo de energia elétrica nos bornes da bateria, captando a regeneração e o consumo de energia elétrica. Deste modo, um PEMS, aplicado a um veículo híbrido é constituído essencialmente por um dispositivo, normalmente um computador portátil, com a capacidade de sincronizar os dados provenientes dos sensores do veículo através da porta “On-Board Diagnostic” (OBD), mais concretamente, o fluxo de corrente na bateria, o estado de carga da bateria (SOC), temperatura do fluido refrigerante, velocidade de rotação do motor, temperatura da entrada do ar no motor, velocidade do veículo, entre outros parâmetros [12]. Os dados provenientes de um analisador de gases de escape são também recolhidos, assim como o caudal mássico de gases de escape (em PEMS regulamentados, para certificação RDE). A esta informação, juntam-se os dados provenientes de um GPS com barómetro e altímetro por forma a determinar a velocidade, assim como a posição no espaço (altura e coordenadas geográficas) [12], podendo observa-se de forma ilustrativa a constituição e o processo de funcionamento de um PEMS na Figura 4.

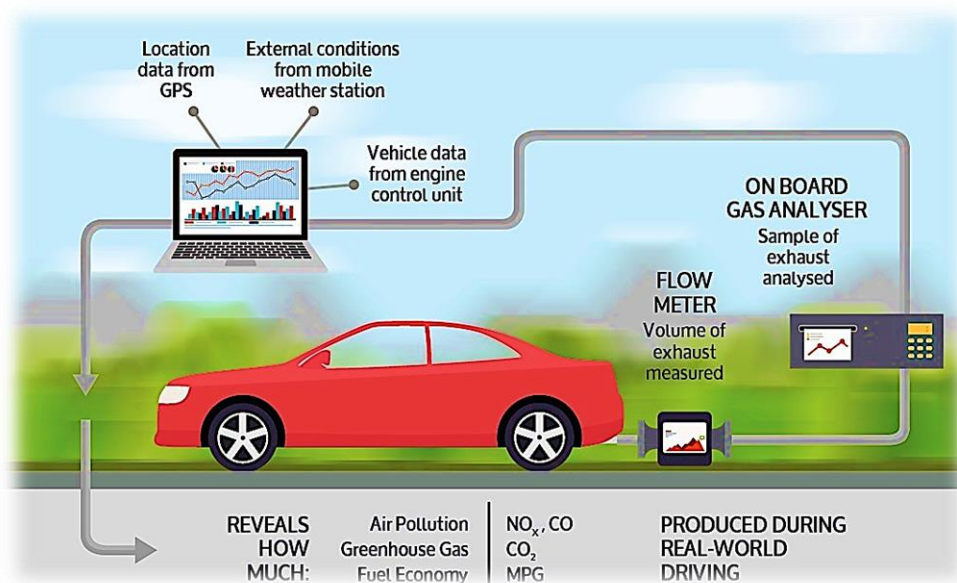


Figura 4- Componentes e processo de funcionamento de um PEMS;[13]

Além da recolha de dados, existem aspetos a serem estudados posteriormente, relativamente aos testes de condução em condições reais de utilização, mais precisamente, a necessidade de ter em atenção a tipologia da viagem, as condições de fronteira e os métodos de análise de dados. A tipologia de viagem deve abranger as condições às quais os veículos estão expostos durante a realização do teste, isto é, deve incluir tanto zonas urbanas como zonas de autoestrada, como também devem ser definidos parâmetros, tais como, o tempo de

viagem, distância percorrida, velocidade, entre outros [14]. As condições de fronteira estão relacionadas com a capacidade de replicar o teste, sendo de notar que estas são influenciadas pelos fatores imprevisíveis, como por exemplo as condições ambientais, a massa total do veículo no teste, as condições dinâmicas, entre outros [14]. Apesar de toda a complexidade envolvente num teste de condução em condições reais de utilização, a sua replicação é dificilmente conseguida, porque tanto as condições ambientais como as condições dinâmicas são características de um local geográfico em específico, logo um teste efetuado num determinado local apenas representa características desse local e em mais nenhum [14]. Deste modo, para ultrapassar os problemas associados à replicação dos testes, foram desenvolvidas metodologias que permitem analisar os dados recolhidos nos testes de condução em condições reais de utilização, sendo estas, a metodologia Power Binning (PB) e a metodologia Moving Averaging Window (MAW) utilizadas normalmente na Europa e a metodologia Vehicle Specific Power (VSP) normalmente utilizada nos Estados Unidos [15]. Verifica-se na Figura 5, todas a fases do processo, descritas anteriormente, associadas a um teste em condições de condução real.

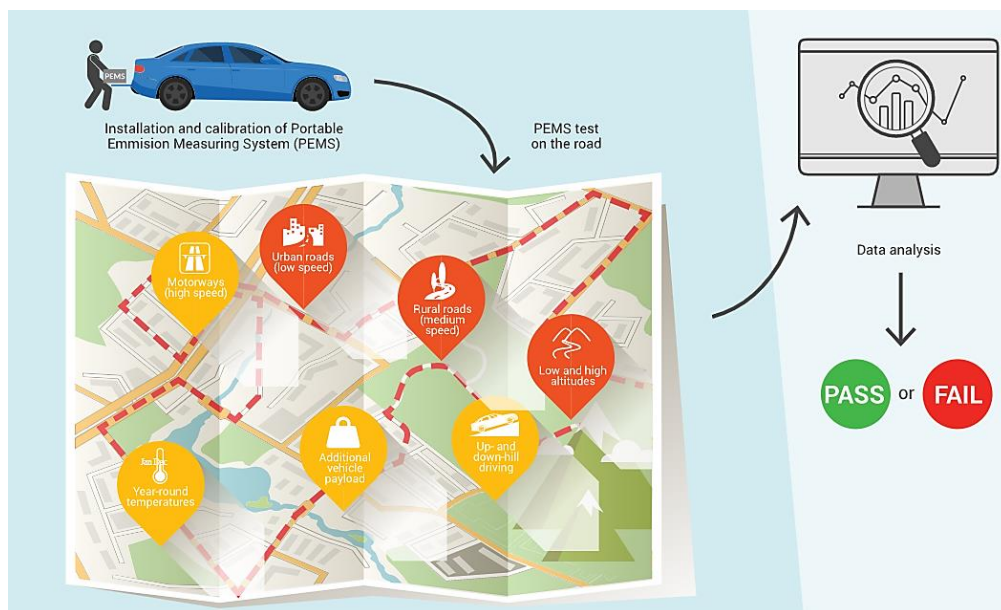


Figura 5- Diferentes fases associadas à realização de um teste em condições de condução real;[16]

O método MAW, desenvolvido pela comissão europeia em parceria com Joint Research Center (JRC), encontra-se associado ao software EMROAD [17], é um método que integra as emissões em secções, com duração determinada pela metade da massa de CO_2 emitido pelo veículo durante o ciclo de certificação, WLTP. Assim, é imposto um incremento de

tempo igual à frequência de aquisição de dados de modo a criar médias móveis das seções, gerando as janelas de massa de CO_2 em relação ao tempo. Além das janelas, é realizada uma análise estatística com o objetivo de identificar as janelas consideradas normais em relação às condições dinâmicas e, finalmente, calcular os resultados das emissões RDE [18]. Ainda assim, este método apenas avalia a viagem no seu global e de acordo com as suas categorias de condução, não avaliando a potência específica, onde ocorrem regimes transientes e que podem ter influência no comportamento das emissões do veículo [15].

O método PB, desenvolvido por investigadores da Universidade Tecnológica de Graz e sendo este o componente associado ao software CLEAR, realiza uma avaliação com base na normalização de uma distribuição específica da frequência da potência normalizada. Posto isto, os valores adquiridos são classificados de acordo com a potência na roda, utilizando o modelo de carga [19] obtido no teste de condução em condições de utilização real e as emissões médias classificadas por classe de potência são ponderadas por forma a obter os valores de emissões para um teste com uma distribuição de potência normal. Devido à sua simplicidade, os dados podem ser analisados em termos da potência específica do veículo, amortecidos em intervalos de 3s [19], permitindo observar os instantes no qual existe uma emissão de poluentes excessiva ou quando existe uma melhor eficiência do veículo ao longo da viagem [15].

O método VSP, desenvolvido por José Luis Jiménez-Palacios [20], aplicado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos e sendo o componente essencial do software MOVES (MOtor Vehicle Emissions Simulator), é um método bastante semelhante ao método PB, mas tem a particularidade de apenas utilizar informação dinâmica e das condições exteriores para quantificar a energia do veículo recorrendo a uma abordagem de “binning” [15]. A metodologia VSP, é então caracterizada como sendo uma representação direta da carga à qual o veículo está exposto, permitindo caracterizar tanto o veículo como o perfil de condução, tendo por base os dados provenientes dos testes realizados em condições reais. Para estimar a potência requerida pelo veículo, a metodologia VSP combina a velocidade, aceleração e o declive da estrada (“road grade”). A cada segundo de condução, é possível enquadrar o VSP nos seus diferentes modos, de acordo com os requisitos de potência correspondentes. Uma vez obtido o valor de cada modo VSP segundo-a-segundo, é possível enquadrar cada modo com o consumo instantâneo de combustível e as emissões

de acordo com fatores de conversão baseados na suposição de relações lineares entre o consumo de combustível e a emissão de CO_2 [21] ou associando a recolha de dados dos gases de escape [20].

De um modo geral, a metodologia VSP é a mais compreensiva, com a capacidade de abranger as diversas tipologias de veículos (convencionais e híbridos) sem apresentar grandes dificuldades na sua implementação e apenas usando dados dinâmicos. Por outro lado, o facto de apenas de se basear em dados dinâmicos pode incorrer na omissão de detalhes e possível invalidação da análise em causa [15]. A metodologia PB, ao usar todos os dados proveniente do veículo, mais propriamente provenientes do grupo gerador de potência (“PowerTrain”) e das condições de estrada, consegue um melhor desempenho ao analisar grupos geradores de potência convencionais, ou seja, veículos a diesel ou gasolina. Em contrapartida, quando existe a necessidade de efetuar a análise de veículos híbridos, o seu desempenho é negativo, uma vez que não considera o grupo gerador de potência elétrico na análise que efetua [15].

Por fim, a metodologia MAW, procede à normalização da viagem realizada em condições reais de condução, permitindo criar zonas com maior impacto e assim garantir uma maior representação do teste efetuado, embora, por vezes a normalização do teste, devido às tolerâncias concedidas durante a análise, pode levar ao desaparecimento de pontos críticos de maior emissão e afetar toda a análise realizada de uma forma negativa. Além deste aspeto negativo, possui um desempenho negativo quando existe a necessidade de efetuar a análise de um veículo híbrido, à semelhança da metodologia PB [15].

Para além das particularidades inerentes à recolha e análise de dados, existe a necessidade de conhecer as características do veículo em análise, isto é, com o desenvolver da tecnologia em questão, foram criados diferentes tipos de veículos híbridos, sendo que cada fabricante distingue o seu veículo diferenciando a tipologia dos componentes aliados à produção de tração, a potência do motor elétrico e térmico, o tipo de transmissão e o tipo de sistema de controlo [22]. Mais precisamente e de acordo com o tipo de gestão entre o uso do motor elétrico e o motor térmico existem três categorias, sendo denominados de híbridos paralelos quando o motor elétrico e o motor térmico geram tração para mover as rodas do carro; híbridos-série quando o motor elétrico gera tração e o motor térmico é usado como apoio para recarregar a bateria e híbridos mistos também conhecido como híbridos Série-Paralelo

ou “Full Hybrid”, sendo o tipo de veículo mais usual, caracterizado pelo uso do motor elétrico e do motor térmico dependendo de uma avaliação instantânea das condições do veículo e do percurso ou então da preferência do utilizador alternando entre as configuração de híbrido em paralelo ou em série como sugere o próprio nome [22]. A Figura 6 ilustra os três cenários descritos anteriormente.

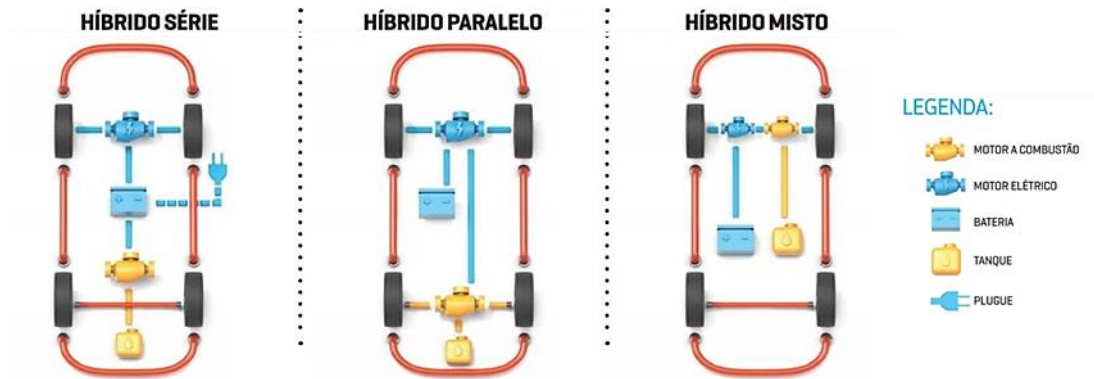


Figura 6- Ilustração dos tipos de veículos híbridos de acordo com o tipo de gestão entre o motor térmico e elétrico;[23]

A particularidade de como é processado o carregamento das baterias de um veículo híbrido, também é uma característica que permite distinguir os veículos híbridos convencionais dos veículos híbridos plug-in, sendo que, os veículos híbridos convencionais apenas possuem a capacidade de recarregar a bateria através de fontes internas, nomeadamente o motor térmico e as travagens regenerativas, enquanto os veículos híbridos plug-in têm a capacidade de recarregar a bateria através de fontes internas, como nos veículos híbridos convencionais, mas também através de fontes externas, conectando-se a bateria do carro a um posto de carregamento comum aos veículos elétricos, sendo estas duas tipologias de veículo de acordo com a arquitetura de carregamento descritas na Figura 7.

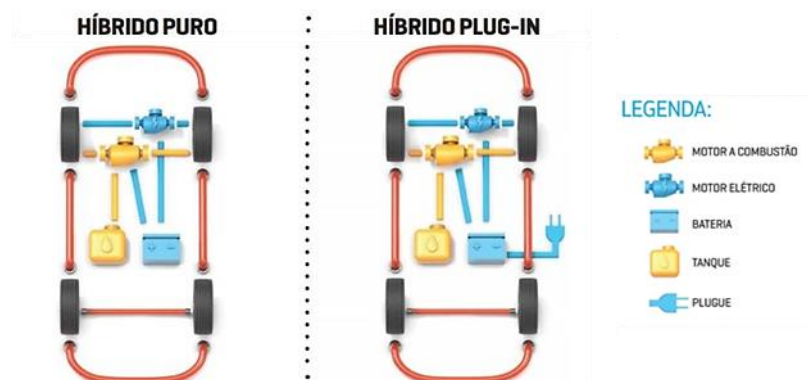


Figura 7-Ilustração do tipo de veículos híbridos de acordo com a arquitetura de carregamento;[23]

Apesar da tecnologia associada a um veículo híbrido plug-in ser bastante interessante, devido a não depender apenas de uma fonte energética (fonte elétrica e fonte térmica) mas também a capacidade de efetuar carregamentos externos, apresenta problemas ao nível da recolha e análise de dados, isto porque, durante a fase de recolha de dados, a montagem dos equipamentos além de ser bastante complexa, coloca os responsáveis pelos testes em contato com níveis de corrente e tensão elétrica elevados, devido à necessidade de efetuar um controlo direto do fluxo de energia nos bornes da bateria de propulsão, possibilitando acidentes por choque elétrico.

Durante a fase de análise de dados o controlo do sistema de gestão de fontes de energia não é bem definido, o que impossibilita conhecer com precisão, em cada instante de condução, qual a fonte que está encarregue de fornecer potência às rodas e incorrer em erros ao avaliar o desempenho do veículo, de acordo com os níveis de emissão de gases poluentes e com os consumos energéticos do veículo. Neste sentido, têm sido desenvolvidos métodos indiretos para determinar a forma como é efetuada a gestão mas também como se proporciona o fluxo de energia elétrica num veículo híbrido plug-in durante a sua fase de descarga, sendo principalmente métodos baseados em regras [24], métodos baseados em lógicas difusas [25], métodos baseados na teoria da otimização como por exemplo Programação Dinâmica (DP) [26], métodos com base no Princípio Mínimo de Pontryagin's (PMP) [27], estratégias com base no consumo mínimo equivalente (ECMS) [28], metodologias inteligentes como o caso de "Machine Learning" [29] e métodos baseados em Redes Neurais [30].

Os métodos baseados em regras, como o próprio nome indica, são métodos que tomam partido de uma regra e a transpõem para o funcionamento do sistema de gestão de energia. Geralmente, este método possui três regras possíveis de aplicação para analisar o funcionamento do sistema de gestão de energia, sendo estas, a regra de foco em alcance elétrico total (All Electric Range Focused, AER-focused), no qual o veículo desempenha o seu ciclo de Charge Depleting (CD) no modo totalmente elétrico independentemente das condições aos quais é exposto, a regra de componente térmica dominante, em que o veículo utiliza normalmente a fonte térmica mas em situações de maior necessidade de potência, auxilia com o motor elétrico e a regra de componente elétrica dominante, em que o veículo utiliza normalmente a fonte elétrica mas em situações de maior necessidade de potência,

auxilia com o motor térmico [24], sendo representado de forma ilustrativa na Figura 8 a aplicação das diferentes regras.

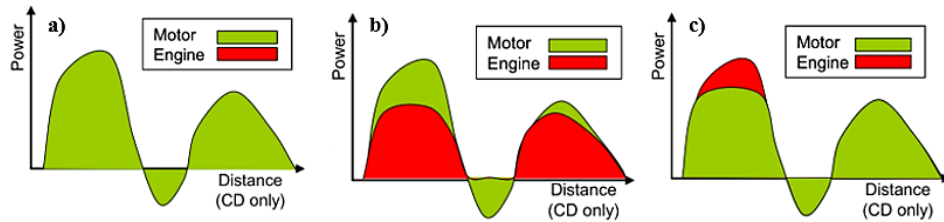


Figura 8- Representação ilustrativa da aplicação das diferentes regras no sistemas de gestão de energia; a) AER focused; b) componente térmica dominante; c) componente elétrica dominante; [24]

Embora sejam regras distintas, ambas apresentam benefícios, mais concretamente o uso da regra AER-focused, apesar de apresentar a necessidade de equipamentos elétricos de maior dimensões e mais caros, apresenta benefícios relativamente a um ciclo elétrico mais longo, o que permite satisfazer os critérios dos regulamentos que apelam aos veículos com emissões nulas [24]. Ainda assim, é uma regra particularmente sensível ao aumento da agressividade de condução ao longo do ciclo, porque a capacidade de satisfazer necessidades superiores ao normal diminui proporcionalmente à diminuição do SOC [24].

Por outro lado, as regras de componente térmica dominante e componente elétrica dominante apesar de não satisfazerem na totalidade os critérios dos regulamentos que apelam aos veículos com emissões nulas, estas apresentam a necessidade de equipamentos elétricos mais pequenos e mais baratos, apesar de ambas as estratégias serem sensíveis à distância de condução, ou seja, no caso de a distância ser curta, a aplicação da regra de componente térmica dominante é uma desvantagem, levando a um consumo de combustível significativo quando comparado com a regra de componente elétrica dominante, mas no caso de a distância ser superior à distância máxima percorrida pelo veículo durante a sua fase de CD, então a regra de componente térmica dominante verifica-se benéfica comparativamente à regra de componente elétrica dominante [24]. Resumindo, a aplicação direta de cada regra não é completamente benéfica, embora o desenvolvimento de modelos inteligentes que aplicam as diversas regras ao longo da viagem, permitem otimizar o sistema de gestão energética e beneficiar ao máximo deste método [24]. Este método permite uma análise de todos os dados em geral, embora é necessário ter em atenção que a aplicação de apenas uma regra, pode provocar erros na análise de acordo com o tipo de sistema de gestão energética projetado pelo fabricante.

Os métodos baseados em lógicas difusas, consistem no desenvolvimento de uma lógica se-então (if-then) aplicada a um controlador com o objetivo de otimizar uma variável tendo em conta as suas entradas. Neste caso, verifica-se que a aplicação de lógica difusa à modelação do funcionamento de um sistema de gestão de energia de um veículo híbrido plug-in é bastante adequada, permitindo otimizar o funcionamento de todos os componentes por forma a obter o melhor desempenho deste [25]. Este método é bastante apreciado devido à sua capacidade de tolerar medidas imprecisas e variáveis, mas também o facto de ser baseado numa lógica sistemática (if-then) que possibilita recriar o cenário benéfico do método baseado em regras, isto é, criar uma estratégia baseada em diferentes regras [25].

O desenvolvimento de um controlador com lógica difusa, depende essencialmente das condições que regem as regras (fuzzy set) e dos conetores lógicos (E, Ou e Não) à semelhança da lógica booliana (fuzzy set operators). Desta forma, quando aplicado este método a um veículo híbrido plug-in deve ter-se em atenção as entradas a controlar, mais propriamente o SOC, velocidade de rotação do motor (térmico e elétrico) e os comandos do condutor (acelerador e travão) que com base no conjunto de regras presentes no controlador geram as saídas mais propriamente, as fontes de energia a utilizar [25]. Verifica-se na Figura 9, um exemplo de um controlador baseado em lógica difusa aplicado a um híbrido paralelo, no qual se ilustra o conjunto de regras presentes neste.

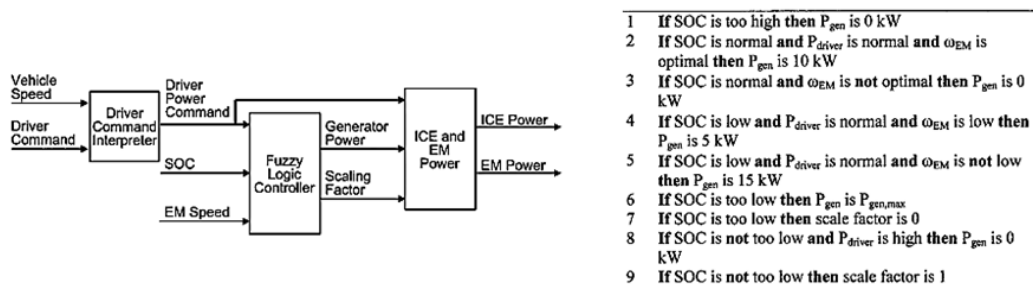


Figura 9- Diagrama de blocos simplificado e regras difusas presentes no controlador de lógica difusa aplicado a um veículo híbrido plug-in;[25]

Apesar de apresentar alguma complexidade no desenvolvimento do método, mais propriamente na criação das regras com base nos mapas de eficiência dos componentes, este apresenta um resultado satisfatório constante, ao permitir um gasto energético otimizado de acordo com os parâmetros de entrada variáveis, resultando em regenerações de energia constantes e um consumo de combustível mínimo, o que demonstra melhoramentos no desempenho do veículo quando comparado com outros métodos, como por exemplo, o

método baseado em regras [25]. Este método permite uma análise de todos os dados em geral, embora necessite sofrer algumas adaptações ao nível das condições impostas para cada veículo em específico, podendo ser aplicado a todo o tipo de ciclos de condução.

Métodos com base na Programação dinâmica, são geralmente processos de múltiplos estágios que tomam decisões por forma a atuar em sistemas dinâmicos. O funcionamento deste método resume-se à criação de soluções ótimas ao longo do tempo baseadas na procura de ações controladas, discretas e possíveis [26]. A aplicação dos métodos com base na programação dinâmica, tem sido explorado mais na atualidade, devido às necessidades elevadas de processamento exigidas pelos mesmos, pelo qual, a sua aplicação pode ser limitada dependendo da quantidade de dados que se pretende analisar. Por outro lado, a aplicação destes métodos em veículos híbridos permite criar múltiplos cenários, nos quais se minimiza o consumo de combustível fóssil, mas também se gere a descarga da bateria de modo a obter um alcance elétrico razoável [26]. Nestes termos, o seu funcionamento é bastante semelhante ao método baseado em lógica difusa, embora não obedeça a regras mas sim a uma equação que depende de entradas e saídas, mais propriamente, depende do binário do motor térmico e do binário do motor elétrico como entradas e como saídas, o consumo de combustível e o SOC do veículo [26].

Por outro lado, de caso para caso, têm sido criados modelos dinâmicos mais simples, como por exemplo o “stochastic dynamic programming” (SDP) por forma a obterem-se resultados sem haver necessidades elevadas de processamento, mas de precisão semelhante [26]. Resumindo, métodos com base em programação dinâmica, permitem ser aplicados de uma forma restrita, estando dependentes de um percurso pré-definido, isto é, o desenvolvimento de uma modelo de programação dinâmica apenas pode ser aplicado a um determinado tipo de ciclo de condução. Por outro lado, os resultados obtidos a partir desse método são bastante precisos, embora existe uma necessidade de poder de computação elevado, a menos que exista um modelo dinâmico já desenvolvido e possível de aplicar ao caso em estudo.

Os métodos com base no Princípio Mínimo de Pontryagin’s (PMP), à semelhança dos métodos anteriores, pretende o desenvolvimento de uma estratégia de controlo capaz de encontrar a solução mais otimizada. Comparativamente aos métodos com base em programação dinâmica, este método apresenta ser computacionalmente eficiente e com resultados quase tão precisos [27]. A aplicação do método com base no PMP a um veículo

híbrido plug-in, pode ser efetuada através de métodos analíticos ou então métodos baseados em mapas. Uma abordagem analítica com base no PMP, utiliza aproximações provenientes dos mapas de eficiência, de modo a atingir uma descrição analítica do custo do estado, para tal, podem ser aplicados dois métodos de aproximação diferentes, isto é, uma aproximação do mapa de consumo de combustível e uma aproximação do mapa de eficiência do sistema elétrico, ou então uma aproximação direta do custo de estado, embora qualquer um destes métodos resulta numa aproximação quadrática do Hamiltoniano, ou seja, uma aproximação quadrática de toda a energia do sistema contida nos seus diferentes estados [27]. A abordagem baseada nos mapas, permite a construção do Hamiltoniano diretamente, com recurso à interpolação da eficiência exata do mapa do motor do sistema em causa. Em ambos os métodos descritos, resulta a execução de um procedimento de três passos após as aproximações realizadas inicialmente em procura da solução ótima, isto é, inicialmente procura-se o valor ótimo de potência elétrica em cada instante de modo a diminuir o Hamiltoniano para cada estado, em seguida, procura-se em instantes futuros a decisão ótima entre ligar e desligar o motor térmico e por fim, das soluções obtidas anteriormente, procura-se a que oferece a trajetória em modo elétrico mais satisfatória [27]. De um modo geral, a aplicação de métodos com base em PMP, têm benefícios visto serem computacionalmente eficientes embora apenas adequados para determinados ciclos de condução e já predeterminados. O uso de métodos analíticos compromete a solução ótima no que toca ao consumo mínimo de combustível comparativamente com métodos baseados em mapas que embora sejam computacionalmente eficientes e com elevada precisão, quando comparados com os métodos analíticos estes tem um tempo de computação mais elevado [27].

Os métodos com base em estratégias de minimização do consumo equivalente (ECMS) são métodos que provêm de uma abordagem instantânea derivada dos métodos com base em PMP. Têm sido bastante aplicados praticamente, devido à sua elevada eficiência computacional e devido a não necessitarem de conhecer a energia global inerente ao perfil de condução [28]. Este método possui a possibilidade de identificar diversas soluções capazes de otimizar o sistema de gestão de um veículo híbrido, ao satisfazer uma quantidade necessária de condições provenientes dos métodos com base em PMP dentro dos limites estabelecidos. Posto isto, a estratégia otimizada de controlo é descoberta através de múltiplas iterações com base nos princípios introduzidos. Apesar da simplicidade do método, a solução otimizada apenas é alcançada com o ajuste perfeito do fator equivalente (EF), isto é, o EF é

usado para medir entre o custo de eletricidade e o custo de combustível presente na função Hamiltoniano definida no método com base no PMP, e o qual não pode ser predeterminado [28]. Tratando-se ainda de um método simplificado, baseado noutro método, este é bastante rígido, o que pequenos desvios do EF ótimo levam a operações matemática impossíveis do ponto de vista dos seus limites reais. Neste sentido, tem levado a desenvolvimentos de um método semelhante, mas com a capacidade de prever o EF, conhecido como métodos baseados em ECMS adaptado, que possibilita a determinação do EF em tempo real e que demonstra resultados positivos em termos da redução do consumo de combustível quando comparado com o método inicial [28]. Por outro lado, a sua aplicação é bastante restrita, isto é, devido à elevada sensibilidade do fator EF, torna este método apenas aplicável a determinados ciclos de condução pré-determinados.

Os métodos baseados em Machine Learning são métodos usados atualmente para tratar de problemas simples devido ao seu elevado tempo de computação durante a fase de aprendizagem do modelo, justificado pela aplicação de inúmeros algoritmos, mas após essa fase tornam-se modelos bastantes eficazes e precisos. Apesar de serem métodos eficazes apenas são válidos para problemas com condições semelhantes para as quais foram desenvolvidos, isto é a sua aplicação é restrita para ciclo de condução pré-determinados [29]. Apesar das inércias em causa, quando o desenvolvimento do método é bem sucedido, permite a sua aplicação em tempo real, logo o algoritmo aprende com a informação instantânea sobre a potência de condução e por conseguinte atualiza a estratégia quando a diferença entre as matrizes de transição de potência anteriores e novas atingem um valor limite [29]. Normalmente, este método quando aplicado a um veículo híbrido plug-in é utilizado para minimizar o consumo de energia elétrica e assim obter o maior alcance elétrico possível, reduzindo a corrente proveniente das baterias. Apesar de permitir uma otimização mais assídua relativamente a métodos mais ortodoxos como é o caso dos métodos baseados em regras, este apresenta variadas limitações, estando em constante dependência das condições em questão, pelo qual a sua aplicação exige um modelo complexo, que pode levar a capacidades de computação ilimitadas o que impede o seu desenvolvimento.

Por último, os métodos baseados em redes neuronais, sendo métodos altamente complexos, dependentes de capacidades de processamento elevadas à semelhança dos métodos de Machine Learning, são geralmente aplicados em questões às quais os métodos anteriormente

descritos não conseguem resolver com tanta eficácia, como por exemplo determinar o fator equivalente necessário nos métodos com base em ECMS de forma eficiente [30]. Embora atualmente, têm-se aplicado métodos baseados em redes neuronais para desenvolver estratégias para o sistema de gestão de energia de veículos híbridos plug-in, tendo como referência métodos já desenvolvidos, mas de aplicação complexa como é caso de métodos baseados no PMP ou então em ECMS [30]. Uma rede neuronal baseia-se simplesmente nas suas entradas e saídas, sendo que, é a seleção destes fatores que influencia de forma significativa o desempenho da rede e da sua utilização, como é possível verificar na Figura 10 que descreve uma rede neuronal aplicada a um veículo híbrido plug-in com objetivo de determinar a potência elétrica a conceder.

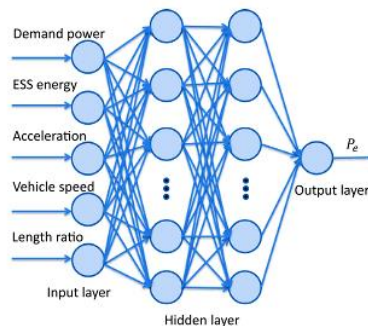


Figura 10- Estrutura da Rede Neuronal;[30]

Embora apresente resultados bastante precisos, comparativamente com métodos baseados em programação dinâmica, mantém-se elevado o tempo de computação, mas também o facto de serem bastante limitados, isto é, à semelhança do método baseado em Machine Learning, caso as condições não sejam as expectáveis pode conduzir a resultados impossíveis de reproduzir, ou seja, tornam a sua aplicação apenas possível para ciclos de condução pré-determinados. Por outro lado, tanto os métodos baseados em Machine Learning como métodos baseados em redes neuronais, são o futuro da tecnologia, com a capacidade de testar inúmeros cenários de acordo com as entradas impostas resultando numa saída.

Olhando para os diversos métodos expostos, verifica-se que existem diferentes níveis de complexidade e diferentes tipos de abordagem, mas que em todos os casos resulta na otimização do sistema de gestão, por modo a obter um menor consumo de combustível fóssil e maior alcance elétrico. Os métodos que apresentam uma menor complexidade, demonstram baixa precisão e baixo controlo, como é o caso dos métodos baseados em regras. Por outro lado, o uso de métodos de alta complexidade, demonstram ser de elevada precisão,

mas baixo controlo, como é o caso da aplicação de redes neuronais, o que impede de conhecer como está a ser executado a gestão energética.

Por fim, o conhecimento da gestão das fontes propulsão para além de ter um papel fundamental para controlar o consumo energético e as emissões de poluentes permite ainda definir o *Utility Factor* (UF). O UF determina a proporção de distância percorrida em modo elétrico relativa à distância total percorrida, sendo definido como zero para um veículo com apenas uma fonte de propulsão térmica e de valor unitário para um veículo com apenas uma fonte de propulsão elétrica [31]. Na situação de um veículo híbrido plug-in, definição de o UF é importante porque quanto maior for o UF menos será o consumo de combustível e consequentemente menor será as emissões de gases poluentes [32]. Neste sentido, o UF pode ser afetado pelo tipo de condução do condutor [33], mas também pelo perfil de carregamento [34], apesar que os processos de certificação tem em consideração apenas a situação mais otimizada, pelo qual existem já algumas alternativas para o cálculo deste [35,36].

Tendo em consideração a aplicação dos métodos mais utilizados na análise de veículos híbridos plug-in, apenas alguns dos métodos podem ser aplicados a todos os tipos de ciclos de condução, não estando dependentes da imposição de condições fronteira. Este trabalho tem como objetivo utilizar dados recolhidos em estrada para avaliar o sistema de gestão de propulsão e efetuar uma análise energética específica para veículos híbridos plug-in, sendo estas métricas adaptáveis a qualquer viagem proveniente de qualquer veículo, pretendendo-se uma definição de um algoritmo simples e generalista que identifique a cada instante de condução as fontes de energia utilizadas.

1.4 – Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta que permita uma caracterização energética e ambiental de um veículo PHEV, através da avaliação da gestão do sistema de propulsão, tendo por base dados recolhidos em condições reais de utilização e que permita superar as falhas existentes nas ferramentas de certificação atuais.

Consequentemente, os objetivos do presente documento, surgem de modo a colmatar as necessidades verificadas, isto é, a inclusão de uma estratégia de utilização das fontes energéticas nas técnicas de análise de dados recolhidos em estrada, mas também os

procedimentos perigosos aos quais os responsáveis dos testes estão expostos quando pretendem analisar um veículo híbrido plug-in.

Deste modo, pretende-se analisar o sistema de gestão de propulsão de um veículo híbrido plug-in através do desenvolvimento de um método indireto, capaz de estimar em cada instante o consumo elétrico, definir o tipo de propulsão selecionada pelo sistema de gestão do veículo a cada segundo e as respetivas causas desta escolha, determinar as emissões de gases com efeito de estufa em cada instante da viagem de acordo as decisões tomadas pelo modelo de previsão do sistema de gestão do veículo e explorar a precisão das metodologias de certificação aplicadas a um PHEV, mais precisamente o *Utility Factor*.

Para tal, o desenvolvimento deste trabalho afim de cumprir com os objetivos definidos, implica a realização de cinco etapas, sendo que, quatro destas são essencialmente metodológicas, mais propriamente a recolha de dados provenientes de ensaios realizados em condições de utilização real, análise e validação da qualidade dos dados recolhidos, desenvolvimento do método indireto de previsão do estado de carga da bateria e do tipo de propulsão utilizado, validação do método através da comparação entre os dados reais e previstos, extrapolação do método indireto para a previsão das emissões dos gases com efeito de estufa e do *Utility Factor* utilizado no processo de certificação e por fim a comparação dos resultados obtidos, de modo a avaliar o desempenho geral do método desenvolvido.

1.5 - Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se subdividida em 4 capítulos.

O primeiro capítulo, Introdução e Objetivos, dispõe não só o problema designado como também os objetivos para que este seja resolvido. Inicialmente é realizado um pequeno enquadramento sobre os problemas ambientais que motivaram a evolução tecnológica do mercado automóvel, seguida de uma explicação do funcionamento de um PHEV e posteriormente foram demonstrados os métodos complexos existentes para controlar o sistema de gestão energética de um PHEV. Por fim, são introduzidos os objetivos inerentes à realização da presente dissertação.

O segundo capítulo, Metodologia, descreve de forma pormenorizada o processo de recolha de dados, o processo de análise de dados, o desenvolvimento do método indireto de previsão

do consumo de energia elétrica, o desenvolvimento do método indireto de predição do sistema de propulsão, o processo de previsão do consumo energético e das emissões dos gases poluentes e o processo de avaliação do *Utility Factor*.

O terceiro capítulo, Resultados e Aplicações, apresenta uma análise dos resultados, comparando essencialmente os resultados obtidos através do método desenvolvido, de acordo com a grandeza em estudo, com os resultados obtidos através do Método VSP Padrão ou então com os resultados medidos. Ainda se aplicou os métodos desenvolvidos a perfis de velocidade aleatórias e averiguou-se a sua capacidade de adaptação. Por fim, dissertou-se sobre os possíveis impactos do sistema de climatização no desempenho de um PHEV.

O quarto capítulo, Conclusões e Desenvolvimento Futuro, apresenta de um modo detalhado os resultados, aferindo as principais conclusões e os passos futuros a realizar.

Capítulo 2 – Metodologia

Para a realização do presente trabalho e de modo a cumprir com os objetivos apresentados, foi necessário realizar uma abordagem metodológica, por forma a estabelecer continuidade em todo o processo e conceder uma visão mais clara deste. Assim sendo, estabeleceu-se que, existem duas vertentes a explorar, sendo estas, a fase de recolha de dados necessários para a realização da abordagem metodológica e todo o processo inerente à realização da abordagem metodológica, isto é a fase de análise e desenvolvimento de métodos.

2.1 – Recolha de Dados

A recolha de dados é uma fase imprescindível para a realização da abordagem metodológica, é essencialmente formada por diferentes componentes que se interligam entre si, como se ilustra na Figura 11, sendo estes, os veículos utilizados nos testes de condução em condições reais, os ciclos de condução executados e o sistema de monitorização de emissões portátil utilizado. A definição das propriedades/condições destes elementos influenciam diretamente os resultados recolhidos, pelo qual a escolha destes exige bastante rigor, de modo a obter resultados válidos e comparáveis entre si. Desta forma, descreve-se de seguida de uma forma detalhada cada elemento referido.



Figura 11- Ilustração dos elementos necessário para possibilitar a recolha de dados;

2.1.1 – Veículos

Na realização do presente estudo foram utilizados dados de dois veículos híbridos plug-in, monitorizados em condições reais de condução no âmbito de trabalhos anteriores [37]. Selecionaram-se então dois veículos híbridos plug-in de diferentes fabricantes com características distintas, mais propriamente em relação à cilindrada, à massa do veículo, à potência combinada, à capacidade da bateria e à tipologia de transmissão utilizada, de modo a contemplar diferentes cenários e assim possibilitar o desenvolvimento de um método viável para aplicar em diferentes tipos de veículos híbridos plug-in como definido nos

objetivos. Desta forma, encontram-se expostas na Tabela 1 as características de cada veículo, sendo ainda de referir que o Veículo A é caracterizado sendo um veículo da tipologia desportivo, mais conhecido como SUV, e o Veículo B é caracterizado sendo um veículo da tipologia Sedan.

Tabela 1- Características dos veículos em estudos;

	Veículo A	Veículo B
Cilindrada	1499 cc	1798 cc
Potência Combinada	221 cv	121 cv
Transmissão/ Caixa de Velocidades	Automática- 6	Planetary Gear e-CVT
Massa do Veículo	1635 kg	1530 kg
Combustível	Gasolina	Gasolina
Bateria/ Distância Elétrica	7.6 kWh/ 40 km	8.8 kWh / 40 km

2.1.2 – Ciclos de Condução

Na realização dos testes de condução em condições reais, foram realizados ciclos de condução fixos, por forma a reunir as condições necessárias para interpretar e avaliar a gestão do sistema integrado de propulsão de acordo com o SOC, estando ilustrado na Figura 12 o ciclo de condução realizado para este estudo.

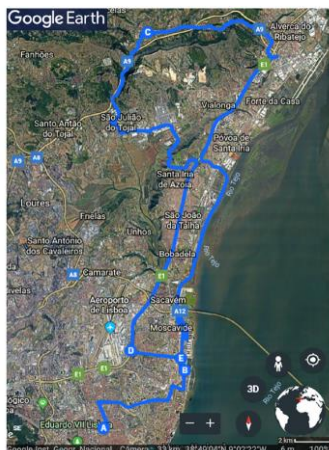


Figura 12-Percurso realizado durante os ensaios efetuados;[38]

Os ciclos de condução foram efetuados na área metropolitana de Lisboa, com um período de aproximadamente duas horas (cerca de 7000 s de recolha de dados por viagem), no qual o carro foi exposto inicialmente a um ambiente urbano, posteriormente a um ambiente de autoestrada e por fim, novamente exposto a um ambiente urbano, o que evidencia o uso de

diferentes modos de condução por parte do sistema de gestão de propulsão do veículo, como se demonstra na Figura 13. Foram realizados quatro ciclos de condução, em cada veículo, no qual se diferenciou o SOC inicial, estando em dois dos ciclos de condução a bateria plenamente carregada e nos restantes dois a bateria encontrava-se descarregada. A variação do SOC, permite obter diferentes resultados de acordo com a tipologia de propulsão utilizada. Ainda a acrescentar, os testes foram realizados durante o período da manhã e final de tarde, de forma a evitar a influência dos fatores externos nos dados recolhidos, como é o caso dos picos de temperatura e do excesso de tráfego.

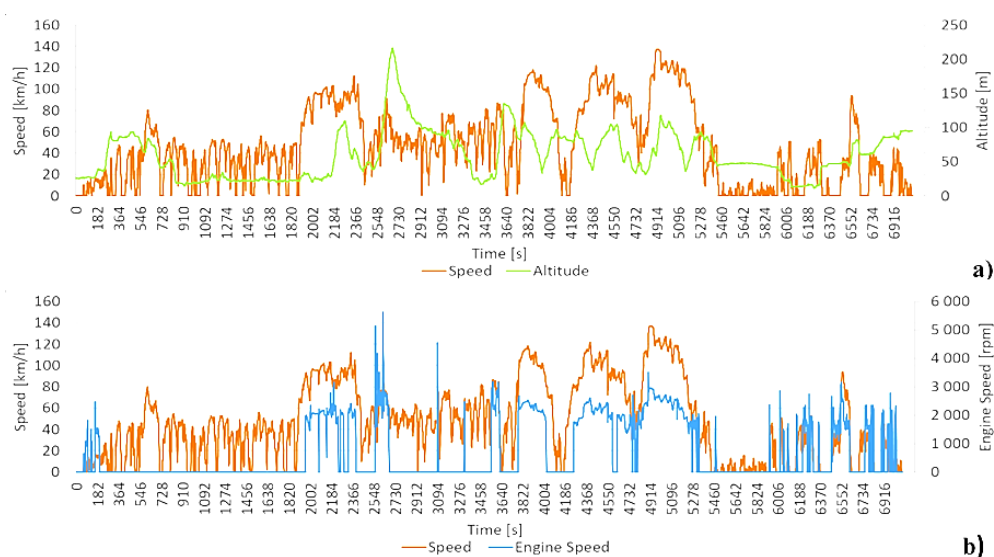


Figura 13-Exemplo de um ciclo de testes realizado, dividido em três fases (urbano, autoestrada, urbano). a) Velocidade e Altitude em função do tempo; b) Velocidade e rotação do motor em função do tempo;

2.1.3 – Sistema de Monitorização de Emissões Portátil (PEMS)

O Sistema de Monitorização de Emissões Portátil (PEMS) é o equipamento responsável pela recolha dos dados dos veículos testados em cada instante da viagem, mais propriamente, uma recolha de dados numa base segundo a segundo. A informação recolhida inclui parâmetros do motor térmico, parâmetros do sistema de propulsão elétrico (SOC), composição dos gases de escape, topografia da estrada e as grandezas dinâmicas associadas ao movimento do veículo.

Neste sentido, um PEMS é constituído por três equipamentos essenciais sendo estes: um leitor de porta de diagnóstico (OBD), responsável pela recolha de todas as informações provenientes dos sensores do veículo, como por exemplo, a velocidade do veículo, a carga e velocidade do motor térmico, o SOC, pressão absoluta no coletor de admissão, temperatura

do líquido refrigerante, caudal mássico de ar, etc; um GPS com altímetro barométrico integrado, responsável pela recolha de informações relativamente à posição e altitude ao longo do teste e um analisador de gases de escape que recolhe a informação e permite posteriormente estimar segundo a segundo o consumo de combustível e a massa de gases poluentes emitidos [20].

Todos estes aparelhos estão conectados a um computador portátil, que sincroniza e grava todos dados a 1Hz, através de um programa desenvolvido para este propósito, recorrendo ao software LabView. A Figura 14 ilustra o sistema de aquisição de dados, PEMS, e os seus diversos componentes enunciados anteriormente.

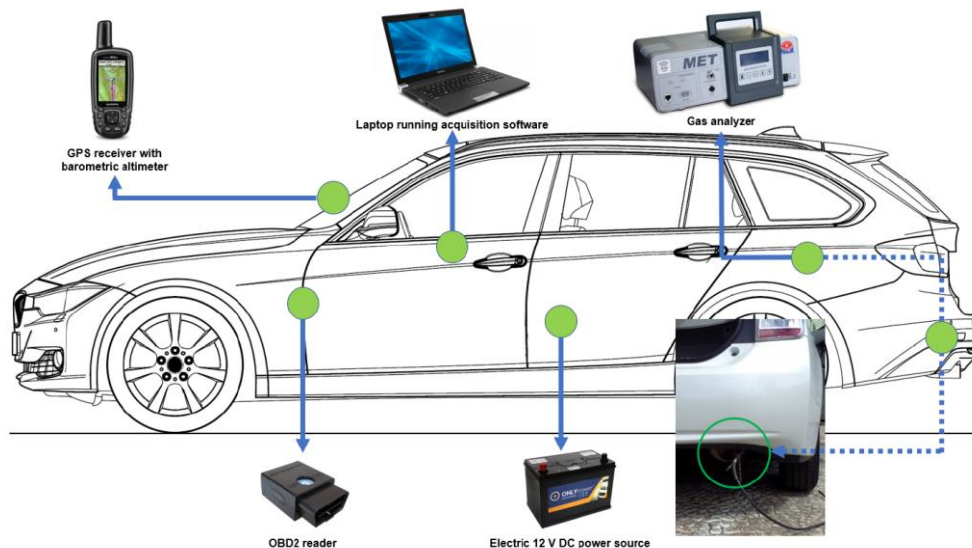


Figura 14-Componentes principais do PEMS instalados nos veículos;[37]

2.2 – Análise de dados e métodos desenvolvidos

Após a fase de recolha de dados, segue-se a fase da análise e desenvolvimento de métodos composta pelo desenvolvimento e aplicação de um conjunto de métodos que seguem uma determinada lógica, por forma a obter resultados que vão de encontro com os objetivos definidos. Desta forma, criou-se um seguimento lógico caracterizado pela aplicação sucessiva de diferentes métodos de modo a criar uma abordagem metodológica contínua. Inicialmente, aplicou-se a metodologia VSP de modo a analisar os dados recolhidos e, com base nestes, desenvolveu-se um método para a analisar o consumo de energia elétrica de forma indireta e o tipo do sistema de propulsão utilizado em cada instante. Por fim, analisaram-se as emissões dos gases poluentes e foi avaliada a aplicação do *Utility Factor*

utilizado na certificação de veículo híbridos plug-in, tendo por base os resultados obtidos através da metodologia VSP e dos métodos desenvolvidos em ciclos reais de condução.

2.2.1 – Análise de dados com recurso ao método VSP

A metodologia Vehicle Specific Power (VSP) foi utilizada para analisar os dados recolhidos nos testes de condução em condições reais de utilização, sendo caracterizada por estimar a potência específica do veículo em cada instante do ensaio tendo por base o conhecimento apenas das propriedades dinâmicas do veículo e das suas condições envolventes. Esta metodologia é caracterizada pelo cálculo do parâmetro VSP, sendo este definido como a potência instantânea na roda utilizada para superar o atrito entre o veículo e o solo, superar o atrito entre o veículo e o ar (drag) e ainda contabilizar a variação da energia cinética e potencial do veículo [20]. Embora a metodologia VSP seja bastante utilizada para determinar as emissões de um veículo [39][40], em conjunto com outros parâmetros, pode-se criar uma abordagem que possibilita estimar o SOC, mas também o tipo de propulsão utilizada em cada instante de condução. Assim sendo, este parâmetro pode ser calculado de acordo com a Equação 1.

$$\begin{aligned}
 VSP &= \frac{\frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{rolling} \times v + F_{aerodynamics} \times v + F_{internal} \times v}{m} = \\
 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \times m \times (1 + \varepsilon_i) \times v^2 + m \times g \times h \right) + C_R \times m \times g \times v + \frac{1}{2} \times \rho_a \times C_D \times A \times (v + v_w)^2 \times v \times \frac{1}{m} = \quad (1) \\
 &= v \times (a \times 1 + \varepsilon_i) + g \times grade \times g \times C_R + \frac{1}{2} \times \rho_a \times \frac{C_D \times A}{m} \times (v + v_w)^2 \times v
 \end{aligned}$$

Onde, v , corresponde à velocidade do veículo (m/s), a , corresponde à aceleração do veículo (m/s^2), ε_i , corresponde ao fator de massa (adimensional), g , é a constante gravitacional ($9,81 \text{ m/s}^2$), $grade$, corresponde à relação entre a altitude e a distância percorrida (adimensional), C_R , corresponde ao coeficiente de atrito entre o veículo e o solo (adimensional), C_D , corresponde ao coeficiente de arrasto (adimensional), ρ_a , corresponde à densidade do ar exterior (kg/m^3), A , corresponde à área frontal do veículo (m^2), m , corresponde à massa do veículo (kg) e v_w , corresponde à velocidade do vento que embate no veículo (m/s). A Equação 1 pode ainda ser simplificada, aplicando os valores típicos dos

coeficientes [20], ou seja, $C_R = 0,00135$, $\rho_a = 1,207 \text{ kg/m}^3$ a 20°C e $\frac{C_D \times A}{m} = 0,0005 \text{ m}^2/\text{kg}$, permitindo assim facilitar o cálculo do VSP, como se verifica na Equação 2.

$$VSP = v \times (1,1 \times a + 9,81 \times grade + 9,81 \times 0,0135) + \frac{1}{2} \times 1,207 \times 0,0005 \times (v + v_w)^2 \times v =$$

$$(2)$$

$$= v \times (1,1 \times a + 9,81 \times grade + 0,132) + 0,000302 \times (v + v_w)^2 \times v$$

Tendo em consideração Equação 2, o cálculo do valor de VSP é realizado a cada segundo da viagem tendo por base a informação recolhida previamente, mais propriamente, a velocidade do veículo, a aceleração do veículo, a distância do ciclo de condução e a altitude, desprezando a velocidade do vento nos ciclos de condução realizados. Posteriormente ao cálculo, o VSP organiza-se em modos, tipicamente em catorze modos, ou para melhor compreensão, em três categorias de condução, mais precisamente, desaceleração ou descida, parado e aceleração ou subida, como se verifica na Tabela 2.

Tabela 2- Modos do Vehicle Specific Power; [41]

Tipo de Condução	Modo de VSP	Condição (kW/ton)
Desaceleração ou movimento descendente	1	$VSP < -2$
	2	$-2 \leq VSP < 0$
Imobilizado	3	$0 \leq VSP < 1$
Aceleração ou movimento ascendente	4	$1 \leq VSP < 4$
	5	$4 \leq VSP < 7$
	6	$7 \leq VSP < 10$
	7	$10 \leq VSP < 13$
	8	$13 \leq VSP < 16$
	9	$16 \leq VSP < 19$
	10	$19 \leq VSP < 23$
	11	$23 \leq VSP < 28$
	12	$28 \leq VSP < 33$
	13	$33 \leq VSP < 39$
	14	$39 \leq VSP$

Com recurso aos modos de VSP é possível estratificar a análise do veículo, tornando-se exequível verificar o comportamento do veículo nos diferentes modos de VSP, tendo em conta apenas um parâmetro proveniente da dinâmica do veículo, por exemplo, o consumo de combustível médio em cada modo de VSP, no qual é expectável um baixo consumo ou nulo nos três primeiros modos de VSP e um consumo crescente nos restantes modos, da mesma forma que é expectável, um aumento do SOC nos três primeiros modos (regeneração de energia elétrica) e decréscimo nos restantes (consumo de energia elétrica).

Paralelamente, a metodologia VSP permite na sua atual forma avaliar os impactos energéticos e ambientais de uma viagem, através da combinação entre o consumo modal do veículo e a distribuição modal de tempo em cada modo VSP, função do percurso e tipo de condução, tal como exemplificado na Figura 15.

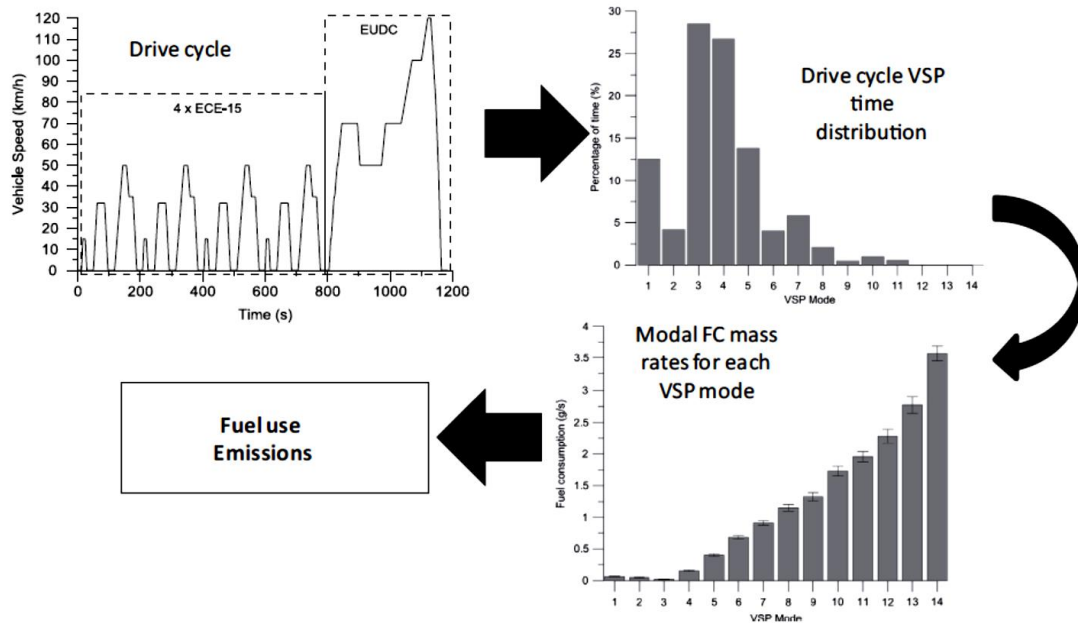


Figura 15- Representação esquemática da metodologia VSP atual utilizada para estimar o consumo e emissões;[42]

No presente trabalho a metodologia VSP irá servir de base à análise dos dados de estrada, contudo pretende-se avaliar os limites da aplicação da metodologia, tendo em consideração a sua reduzida informação sobre o veículo. No caso dos PHEV, veículos complexos com duas fontes energéticas e inteligência associada à gestão das suas fontes de energia, este trabalho irá avaliar a métricas para incluir informação adicional à metodologia VSP, tal como é utilizada atualmente. A Tabela 3 apresenta um resumo das áreas nas quais incidiu uma análise comparativa sobre a utilização da metodologia VSP como é usada atualmente, designada então de Método VSP Padrão (com pouca informação do veículo, seguindo a Figura 15) e metodologia incluindo informação adicional genérica sobre a utilização de duas fontes de energia, designada por Método ABCD.

Tabela 3- Resumo da análise comparativa entre o Método VSP Padrão, Método ABCD e a realidade;

Secção/título	Método VSP Padrão	Método ABCD	Realidade
2.2.2 – Método Indireto de Previsão do Consumo de Energia Elétrica	SOC (Regime CD)	SOC (Regime CD)	SOC (Regime CD)
	SOC (Regime CS)	----	SOC (Regime CS)
2.2.3 – Método Indireto de Predição do Sistema de Propulsão	----	Gestão das Fontes de Energia	Gestão das Fontes de Energia
2.2.4 – Estimativa do Consumo Energético e das Emissões dos Gases Poluentes	Consumo Combustível e Eletricidade	Consumo Combustível e Eletricidade	Consumo Combustível e Eletricidade
	Emissão dos Gases Poluentes	Emissão dos Gases Poluentes	Emissão dos Gases Poluentes
2.2.5 – Avaliação do Utility Factor	<i>Utility Factor</i>	<i>Utility Factor</i>	<i>Utility Factor</i>

Com este tipo de abordagem serão desenvolvidos métodos que possibilitem prever a variação do SOC, como também o tipo de propulsão utilizada em cada instante da viagem possibilitando assim, estimar o consumo energético (combustível e eletricidade), estimar as emissões de gases poluentes e estimar o UF característico de cada ciclo de condução.

2.2.2 – Método Indireto de Previsão do Consumo de Energia Elétrica

De modo a evitar a exposição dos técnicos responsáveis pela realização dos testes em estrada a tensão e corrente elétrica elevada e evitar a necessidade de equipamentos extra, uma possível forma de se obter um controlo do fluxo de energia elétrica da bateria é através de métodos indiretos. O método indireto de previsão do consumo de energia elétrica desenvolvido no presente trabalho é baseado na relação entre a variação do SOC sobre um intervalo de tempo específico (medida da variação de energia por unidade de tempo) e o valor médio de VSP (medida de potência na roda) nesse mesmo intervalo. Desta forma, pretende-se obter resultados de precisão superior quando comparados com os dados recolhidos via OBD, caracterizados por apresentarem baixa precisão (resolução mínima de $SOC = 1\%$). O funcionamento de um veículo híbrido plug-in, como referido anteriormente, consiste no uso de duas fontes de energia, térmica e elétrica, que funcionam de uma forma

isolada ou em conjunto e no qual a sua gestão está diretamente relacionada com as propriedades dinâmicas e geográficas ao longo dos ciclos de condução (velocidade, aceleração e declive) como também está relacionada com o SOC em cada instante. Neste sentido, o desenvolvimento do método surgiu com base no conhecimento do parâmetro VSP, que representa a potência instantânea na roda utilizada para superar o atrito entre o veículo e o solo e sendo esta potência gerada por uma fonte elétrica e/ou térmica, o que possibilita relacionar o VSP com o SOC, à semelhança da relação entre o VSP e o consumo de combustível e a relação entre o VSP e as emissões de gases poluentes [14], apesar de serem métodos de estimativa distintos.

O método indireto de previsão do consumo de energia elétrica desenvolvido no presente trabalho divide-se essencialmente em duas etapas, na qual a primeira etapa é referente à elaboração de duas retas tendência que caracterizam a relação entre a variação do SOC sobre um intervalo de tempo específico e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo e a segunda etapa é alusiva à modelação das retas tendência ao ciclo de condução em estudo em cada instante.

Desta forma, o desenvolvimento da primeira etapa caracteriza-se por analisar os dados respeitantes a cada ciclo de condução realizado, específicos de cada veículo, mais propriamente, analisar a variação do SOC ao longo do ciclo de condução durante o regime de Charge Depleting (CD) e durante o regime de Charge Sustaining (CS). Inicialmente, identifica-se o instante no qual se verifica a mudança de regime em cada veículo, ou seja, definiu-se que o regime de CS inicia-se quando se atinge um SOC de 10% para o veículo A e para o veículo B quando se atinge um SOC de 15%, uma vez que abaixo deste valor, o sistema de gestão de propulsão opta maioritariamente pelo o uso da fonte térmica, o que define a necessidade de diferentes análises.

Consequentemente, para o regime de CD, efetuou-se uma análise, aos dois ciclos de condução disponíveis, aferentes a cada veículo, onde se teve em consideração a variação do SOC sobre um intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo de tempo tendo em conta duas condições, quando o motor térmico se encontra desligado ($rpm=0$) e quando o motor térmico se encontra ligado ($rpm\neq 0$). A partir desta análise, obtém-se diversos pontos referentes à relação entre a variação do SOC sobre um intervalo de tempo específico e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, resultando em duas retas

tendência específicas para cada veículo e diferenciadas pelas condições aferidas anteriormente ($rpm=0$ e $rpm \neq 0$), caracterizadas por uma equação do tipo, $y = mx + b$, no qual a variável y corresponde ao gasto energético no instante em estudo, a variável m o declive da reta obtido e característico do veículo em estudo, a variável x o parâmetro VSP no instante em estudo e a variável b representa o coeficiente linear característico da reta em estudo.

Por outro lado, o Método VSP Padrão para avaliar os ciclos de condução durante o regime de CD, não possui qualquer sensibilidade relativamente às fontes de propulsão em uso, isto é, o Método VSP Padrão efetua o cálculo do SOC de uma forma cega. A metodologia então utilizada, é semelhante à desenvolvida anteriormente, apesar da reta tendência ser composta por todos os pontos obtidos anteriormente, não havendo a diferenciação do estado de funcionamento da fonte térmica, ou seja, resulta apenas na construção de uma reta tendência, caracterizada por uma equação do tipo, $y = mx + b$.

Durante o regime de CS, o método desenvolvido no presente trabalho apresenta uma metodologia semelhante à do Método VSP Padrão, sendo mais uma vez insensível à gestão das fontes de propulsão, apesar de se assumir que neste regime a gestão tende a escolher a fonte térmica mais frequentemente devido a apresentar um SOC baixo. Neste caso efetuou-se uma análise, aos quatro ciclos de condução disponíveis, aferentes a cada veículo, obtendo-se diversos pontos referentes à relação entre a variação do SOC sobre um intervalo de tempo específico e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, resultando em apenas uma reta tendência específica para cada veículo, caracterizada por uma equação do tipo, $y = mx + b$ sendo o significado das variáveis semelhante às apresentadas anteriormente no regime de CD.

O desenvolvimento da segunda etapa, no caso do regime de CD, caracteriza-se por modelar em cada instante, as retas tendências obtidas na primeira etapa aos dados aferentes de cada ciclo de condução atendendo às fontes de propulsão em uso, dependendo do veículo em estudo. Como não existe um parâmetro que defina em cada instante as fontes de propulsão em uso, existe a necessidade de criar uma métrica que possibilite a caracterização da gestão destas. No presente trabalho, a métrica aplicada foca-se principalmente na comparação do consumo de combustível em cada instante com o consumo de combustível médio do modo

de VSP correspondente, resultando posteriormente na atribuição de uma equação de cálculo, sendo esta atribuição descrita pelas seguintes analogias:

- Quando a velocidade é 0 m/s e o consumo de combustível é nulo, então significa que veículo encontra-se em estado de repouso, logo trata-se de uma situação de ausência de consumo e regeneração de energia elétrica;
- Quando a velocidade é diferente de 0 m/s o consumo de combustível é nulo então significa que o veículo desloca-se utilizando apenas a fonte de propulsão elétrica, logo trata-se de uma situação de consumo de energia elétrica;
- Quando a velocidade é diferente de 0 m/s e existe um consumo de combustível diferente de zero, mas inferior ao consumo de combustível médio no modo de VSP, então significa que o veículo desloca-se utilizando ambas as fontes de propulsão (elétrica e térmica), logo trata-se de uma situação de regeneração de energia elétrica;
- Quando a velocidade é diferente de 0 m/s e existe um consumo de combustível diferente de zero, mas superior ao consumo de combustível médio no modo de VSP, significa que o veículo desloca-se apenas com a fonte de propulsão térmica, logo trata-se de uma situação de ausência de consumo e regeneração de energia elétrica;

Tendo por base a métrica descrita anteriormente, adaptam-se as equações de reta obtidas às analogias criadas, isto é, quando o funcionamento do carro apenas depende da fonte de propulsão elétrica admite-se uma situação de consumo de energia elétrica, logo efetua-se o cálculo tendo por base a equação característica de quando o motor térmico se encontra desligado ($rpm=0$), no qual a resultante da equação, é subtraída ao SOC anterior.

No caso de o funcionamento do carro depender de ambas as fontes de propulsão, admite-se tratar-se de uma situação de regeneração, logo efetua-se o cálculo tendo por base a equação característica de quando o motor térmico se encontra ligado ($rpm\neq 0$), no qual a resultante da equação, é adicionada ao SOC anterior. Por fim, quando se trata de uma situação de ausência de consumo e regeneração de energia elétrica, no qual o funcionamento do carro é nulo ou então depende apenas da fonte de propulsão térmica, admite-se tratar de uma situação onde não há consumo ou regeneração de energia logo o SOC neste instante é semelhante ao anterior. Pode-se visualizar na Figura 16, as três possíveis situações descritas tendo em conta as condicionantes impostas.

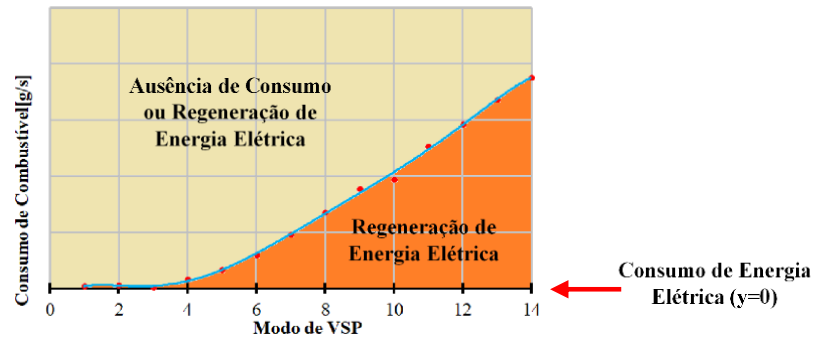


Figura 16-Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação (Consumo, Regeneração e Ausência de Consumo e Regeneração de Energia Elétrica);

Por outro lado, as três situações descritas podem ser traduzidas nas equações 3, 4 e 5 respetivamente, conhecendo a variável k , que representa o instante em estudo,

$$\text{Consumo de energia elétrica} \quad SOC_k = SOC_{k-1} - (y)_{(rpm=0)} \rightarrow SOC_{k-1} - (m_{CD} \times VSP_k + b_{CD})_{(rpm=0)} \quad (3)$$

$$\text{Regeneração de energia elétrica} \quad SOC_k = SOC_{k-1} + (y)_{(rpm \neq 0)} \rightarrow SOC_{k-1} + (m_{CD} \times VSP_k + b_{CD})_{(rpm \neq 0)} \quad (4)$$

$$\begin{array}{l} \text{Ausência de Consumo e} \\ \text{Regeneração de Energia Elétrica} \end{array} \quad SOC_k = SOC_{k-1} \quad (5)$$

O cálculo do SOC estimado repete-se em cada instante e termina quando se atinge o limite mínimo do SOC em regime de CD estabelecido anteriormente para cada veículo. Por outro lado, o desenvolvimento da segunda etapa utilizando o método aplicado atualmente, carece apenas de modelar em cada instante, a reta tendência obtida na primeira etapa aos dados aferentes de cada ciclo de condução, dependendo do veículo em estudo. Nesta situação não existe a necessidade de conhecer as fontes de propulsão em uso, o que possibilita aplicação direta da equação de reta obtida anteriormente com base nos dados do regime de CD, como se demonstra na equação 6.

$$SOC_k = SOC_{k-1} - y \rightarrow SOC_{k-1} - (m_{CD} \times VSP_k + b_{CD})_{gerat} \quad (6)$$

O desenvolvimento da segunda etapa, no caso do regime de CS, é semelhante ao desenvolvimento da segunda etapa aquando o uso do método aplicado atualmente, ou seja, caracteriza-se por modelar em cada instante, a reta tendência obtida na primeira etapa aos dados aferentes de cada ciclo de condução, dependendo do veículo em estudo. Nesta situação

não existe mais uma vez a necessidade de conhecer as fontes de propulsão em uso, permitindo a aplicação direta da equação de reta obtida anteriormente com base nos dados do regime de CS, como se demonstra na equação 7.

$$SOC_k = SOC_{k-1} - y \rightarrow SOC_{k-1} - (m_{CS} \times VSP_k + b_{CS}) \quad (7)$$

O cálculo do SOC estimado repete-se em cada instante e termina quando se atinge o fim do ciclo de condução. Por fim, traça-se uma curva tipo, tendo em conta os cálculos efetuados tanto para o regime CD como para o regime CS, possibilitado efetuar uma comparação entre a curva real e a curva estimada através dos dois diferentes métodos aplicados.

2.2.3 – Método Indireto de Predição do Sistema de Propulsão

Durante o desenvolvimento do método indireto de previsão do consumo elétrico, verificou-se a existência da falta de informação acerca do tipo de sistema de propulsão usado em cada instante, apesar de se ter criado uma métrica que permite conhecer ao certo qual é a fonte de propulsão utilizada.

A métrica desenvolvida além de simples apresenta uma aplicação direta quando a recolha de dados é realizada por um equipamento PEMS, descrito anteriormente e com a capacidade de recolher informações acerca do veículo, mais propriamente informações do motor térmico, emissões de gases poluentes, propriedades geográficas, propriedade dinâmicas e informações acerca do SOC, evitando ainda a necessidade de equipamentos extra e a necessidade de expor os responsáveis pelos testes a níveis de corrente elétrica elevados, conduzindo a um possível acidente por choque elétrico.

Por outro lado, durante a realização dos ciclos de condução, nem sempre é utilizado um equipamento PEMS, sendo apenas utilizado um GPS com altímetro barométrico, que permite a recolha das propriedades geográficas (distância e altura) e dinâmicas do veículo (velocidade). Com base apenas nestas informações, torna-se impossível de aplicar a métrica desenvolvida anteriormente como também se torna complicado de controlar a gestão das fontes de propulsão devido à inexistência de informação.

Neste seguimento, o desenvolvimento do Método Indireto de Predição do Sistema de Propulsão ou Método ABCD, prevê colmatar as dificuldades descritas anteriormente, de um

modo simples e de uma forma geral, aplicável a veículos híbridos plug-in de diferentes fabricantes. O conceito utilizado no desenvolvimento do presente método é bastante semelhante ao conceito utilizado pelo método de lógica difusa, apesar dos parâmetros que condiciona o funcionamento das fontes de propulsão serem exclusivamente propriedades dinâmicas do veículo (VSP, velocidade e aceleração), enquanto o método de lógica difusa se baseia apenas no parâmetro do SOC.

Para o desenvolvimento do presente método, recorreu-se ao uso dos dados provenientes dos ciclos de condução, apenas no regime CD, mais propriamente, as quatro viagens realizadas, no qual os veículos apresentavam um SOC inicial máximo (bateria completamente carregada), não havendo diferenciação nos veículos por forma a obter um algoritmo genérico. O algoritmo genérico que caracteriza o método desenvolvido, baseia-se na alocação em cada instante dos dados provenientes dos ciclos de condução em zonas, no qual cada zona aloca um modo de propulsão, ou seja, caracteriza o estado de funcionamento independente ou em conjunto das fontes de propulsão (térmica e elétrica), tendo como condicionamento apenas os parâmetros dinâmicos (VSP, velocidade, aceleração).

Por forma a conferir simplicidade ao método desenvolvido, foi atribuído uma letra a cada zona representativa de um modo de propulsão, e pelo qual o método desenvolvido foi nomeado de Método ABCD, sendo as zonas descritas de acordo com as seguintes premissas:

- Zona A – Caracteriza o instante no qual a fonte de propulsão térmica e a fonte de propulsão elétrica se encontram desligadas;
- Zona B - Caracteriza o instante no qual a fonte de propulsão térmica se encontra ligada e a fonte de propulsão elétrica se encontra desligada;
- Zona C - Caracteriza o instante no qual a fonte de propulsão térmica se encontra desligada e a fonte de propulsão elétrica se encontra ligada;
- Zona D - Caracteriza o instante no qual a fonte de propulsão térmica e a fonte de propulsão elétrica se encontram ligadas, havendo uma interação entre ambas.

A Figura 17, ilustra as premissas referidas anteriormente, por forma a compreender melhor a alocação em cada instante dos dados, reforçando a ideologia de que cada zona caracteriza um modo de propulsão, dependendo do estado de funcionamento das fontes de propulsão.

		Motor Térmico (ICE)	
		0	1
Motor Eléctrico (EV)	0	A	B
	1	C	D

Figura 17-Zonas que caracterizam em cada instante a gestão do sistema de propulsão (0- Desligado;1- Ligado);

Posto isto, o desenvolvimento do Método ABCD carece da realização de duas etapas, sendo a primeira etapa aferente à caracterização em cada instante dos modos de propulsão tendo em conta toda a informação recolhida através do PEMS, ao longo dos ciclos de condução e tendo por base a métrica criada durante o desenvolvimento do método indireto de previsão do consumo de energia eléctrica. A segunda etapa caracteriza-se pela criação do algoritmo com a capacidade de estimar em cada instante os modos de propulsão, tendo por base apenas o uso de informação dinâmica.

O desenvolvimento da primeira etapa pode ser descrito, como a aplicação da métrica desenvolvida anteriormente no método indireto de previsão do consumo de energia eléctrica, aos dados provenientes do ciclo de condução em regime de CD, no qual desta forma, se obtém uma caracterização da gestão dos sistemas de propulsão do veículo aproximada à realidade e comparável com a predição da gestão dos ciclos de propulsão desenvolvida na segunda etapa. Ainda assim, a métrica desenvolvida anteriormente, já permitia distinguir as fontes de propulsão em uso, apesar de não fazer a distinção em zonas. Desta forma, aplicando caracterização por zonas à métrica já desenvolvida, esta pode ser agora caracterizada pelas seguintes analogias:

- Quando a velocidade é 0 m/s e o consumo de combustível é nulo, então significa que veículo encontra-se em estado de repouso, no qual não existe nenhuma fonte de propulsão a atuar, o corresponde à Zona A;
- Quando a velocidade é diferente de 0 m/s e existe um consumo de combustível diferente de zero, mas superior ao consumo de combustível médio no modo de VSP, então significa que o veículo desloca-se utilizando apenas a fonte de propulsão térmica, o corresponde à Zona B;
- Quando a velocidade é diferente de 0 m/s o consumo de combustível é nulo então significa que o veículo desloca-se utilizando apenas a fonte de propulsão eléctrica, o corresponde à Zona C;

- Quando a velocidade é diferente de 0 m/s e existe um consumo de combustível diferente de zero, mas inferior ao consumo de combustível médio no modo de VSP, então significa que o veículo desloca-se utilizando ambas as fontes de propulsão (elétrica e térmica), o corresponde à Zona D;

A Tabela 4, reúne as analogias descritas anteriormente, de uma forma mais prática, permitindo visualizar as condicionantes de cada zona de propulsão para aplicar nos dados de estrada recolhidos.

Tabela 4- Condições limite que caracterizam cada modo de propulsão (Dados Reais);

Zonas	Velocidade [m/s]	Consumo de Combustível [g]	Rotações do motor térmico [rpm]
Zona A	$v = 0$	$m_{\text{fuel}} = 0$	RPM=0
Zona B	$v \neq 0$	$m_{\text{fuel}} > \bar{m}_{\text{VSPfuel-Veículo}}$	RPM \neq 0
Zona C	$v \neq 0$	$m_{\text{fuel}} = 0$	RPM=0
Zona D	$v \neq 0$	$m_{\text{fuel}} < \bar{m}_{\text{VSPfuel-Veículo}}$	RPM \neq 0

Com base então nas analogias anteriores, analisou-se os quatros ciclos de condução alocando cada instante destes nas zonas descritas, possibilitando agora o desenvolvimento do algoritmo inerente à segunda etapa, o qual depende da primeira de modo a aumentar o acerto deste, ou seja, aumentar a exatidão do presente método. A segunda etapa descreve-se como o desenvolvimento do algoritmo com a capacidade de analisar em cada instante as propriedades dinâmicas e aferir com base nestas o modo de propulsão em uso, mais propriamente alocar o instante numa das zonas descritas anteriormente.

Como referido anteriormente, o conceito por de trás do algoritmo em causa é muito semelhante ao conceito utilizado na metodologia de lógica de difusa, no qual se desenvolve o algoritmo com base em condicionantes. Neste preciso caso, o algoritmo desenvolvido com recurso à ferramenta Microsoft Excel, baseia-se no condicionamento de três parâmetros dinâmicos, sendo estes, a velocidade, a aceleração e o VSP. A escolha destes três parâmetros dinâmicos, deve-se à sua influência na gestão das fontes de propulsão aquando o veículo se encontra em regime de CD. Nesta situação o sistema de gestão de propulsão atende às

condições exteriores em cada instante por forma a promover o melhor desempenho do veículo, priorizando o uso da fonte elétrica à fonte térmica.

Neste seguimento, o desenvolvimento do algoritmo pode ser dividido em três fases, sendo cada umas destas correspondentes ao desenvolvimento de condicionantes capazes de caracterizar cada zona. Durante a primeira fase, foram criadas as condicionantes capazes de limitar a Zona A, sendo esta a zona mais simples de condicionar devido a caracterizar uma situação de repouso, ou seja, todos os parâmetros em questão são nulos. Durante a segunda fase, foram criadas as condicionantes capazes de limitar a Zona C, sendo esta zona caracterizada por velocidades e acelerações reduzidas, e quando existe a presença de velocidades mais elevadas o VSP associado é reduzido atingindo por vezes valores negativo. Por fim, durante a terceira fase, foram criadas condicionantes que permitiram limitar a Zona B, sendo esta zona caracterizada por velocidades intermédias, acelerações elevadas e VSP elevado resultando que os instantes ainda não condicionados são alocados na Zona D. Neste sentido descreve-se de seguida na Tabela 5 as condições limite otimizadas consideradas para a construção do algoritmo e que descrevem cada zona.

Tabela 5-Condições limite que caracterizam cada modo de propulsão (Algoritmo ABCD);

Zonas	Velocidade [m/s]	VSP [kW/ton]	Aceleração [m/s²]
Zona A	$v = 0$	$VSP = 0$	$a = 0$
Zona C	$0 < v < 10,1$	$VSP > -25$	—
	$0 < v < 16$	$-10 < VSP < 10$	$a < 1$
	$16 < v < 17,5$	$-3 < VSP < -9$	—
	$10 < v < 16$	$-10 < VSP < 19$	—
	$16 < v < 22,6$	$0,5 < VSP < 12$	—
Zona C	$18 < v < 24$	$-20 < VSP < -4$	—
	$22,6 < v < 24,5$	$0 < VSP < 15$	—

	$24,5 < v < 30$	$-5 < VSP < 5$	–
Zona D	$5 < v < 14$	$VSP > -45$	–
	$5 < v < 18$	$VSP > -30$	–
	$5 < v < 16$	$-11 < VSP < 40$	–
	$16 < v < 17,5$	$16 < VSP < 42$	–
	$16 < v < 17,5$	$-21 < VSP < -10$	–
	$17,5 < v < 20,2$	$-40 < VSP < 42$	–
	$21,5 < v < 25,6$	$VSP < -3$	–
	$21,5 < v < 25,6$	$7 < VSP < 19$	–
	$21,5 < v < 25,6$	$VSP > 35$	–
	$25,6 < v < 28$	$VSP > 30$	–
	$v > 28$	$VSP < 7$	$a < 4$
	$v > 28$	$VSP < 15$	–
Zona B	–	–	–

Apesar de, em teoria o algoritmo descrito ser simples, a análise inerente ao desenvolvimento do mesmo é morosa, no qual existe a necessidade de efetuar inúmeras replicações, utilizando grandezas diferentes em cada parâmetro por forma a aumentar a exatidão do método, ainda assim, torna-se também uma análise complexa devido à necessidade de se tratar de algoritmo genérico que possua a capacidade de obter resultados precisos para ambos os veículos em estudo no qual as grandezas dos parâmetros envolventes podem ser ligeiramente distintas de veículo para veículo.

O processo de obtenção das grandezas condicionantes envolve a análise de intervalos com um período de duzentos segundos cada, até se atingir o fim de cada ciclo de condução em

regime CD, além de uma análise gráfica das curvas de Velocidade, Aceleração e VSP em ordem ao tempo e comparativamente com a mudança de modos de propulsão obtidos na primeira etapa, por forma a averiguar as grandezas que melhor caracterizam cada condicionante aferente às zonas em estudo. Posteriormente à otimização do algoritmo, este foi implementando ao ciclo de condução já realizado apesar de ter capacidade para ser implementado em tempo real.

2.2.4 – Estimativa do Consumo Energético e das Emissões dos Gases Poluentes

A estimativa do consumo energético (consumo de combustível fóssil e consumo de energia elétrica) e das emissões dos gases poluentes surge na continuação do método indireto de predição do sistema de propulsão, sendo estes os parâmetros que avaliam o desempenho e a exatidão do método desenvolvido. Neste seguimento, além de se avaliar a exatidão da predição do método desenvolvido, ainda pode ser realizada uma comparação com a estimativa calculada através do Método VSP Padrão, possibilitando averiguar qual é capaz de estimar melhor o resultado e que melhor se aproxima da realidade.

Desta forma, o cálculo do consumo energético e das emissões dos gases poluentes pode ser feito, tendo em conta três abordagens distintas, sendo estas, com base nos dados reais, com base no Método ABCD e com base no Método VSP Padrão. A abordagem baseada nos dados reais é efetuado com base nas informações recolhidas durante o ciclo de condução, isto é, o cálculo resume-se ao somatório do parâmetro em estudo (consumo de combustível, consumo de energia elétrica e emissões de gases poluentes) para o regime CD e para o regime CS, como se descreve na equação 8 e 9, respetivamente.

$$x_{totalCD} = \sum_{i=0}^{t_{CD}} x_i \quad (8)$$

$$x_{totalCS} = \sum_{i=t_{CD}}^{t_{CS}} x_i \quad (9)$$

Nesta situação, o parâmetro x , representa uma das grandezas em estudo, isto é, pode representar o consumo de combustível (g), o consumo de energia (kWh) ou então a emissão de gases poluentes, sendo de realçar a emissão de CO_2 (g), a emissão de CO (g), a emissão de HC (g) e a emissão de NO_x (g). O resultado proveniente do cálculo realizado, tendo em

conta a abordagem baseada nos dados reais, é utilizado como referência, possibilitando comprovar a validade do método desenvolvido, aferir a exatidão do mesmo e efetuar a comparação de qual dos métodos melhor retrata a realidade.

Neste seguimento, o cálculo do consumo energético e das emissões dos gases poluentes, tendo em conta a abordagem baseada no Método VSP Padrão, é efetuado com base na média do parâmetro em estudo por modo VSP, isto é, o cálculo resume-se ao somatório do produto entre a média por modo de VSP do parâmetro em estudo (consumo de combustível, consumo de energia elétrica e emissões de gases poluentes), a percentagem de tempo nesse mesmo modo de VSP e o tempo total de viagem de acordo com o regime em questão, regime CD ou regime CS, descrito pela equação 10 e 11, respetivamente.

$$x_{totalCD} = \sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CD} \quad (10)$$

$$x_{totalCS} = \sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CS} \quad (11)$$

Nesta situação, à semelhança da situação anterior, com base nos dados reais, o parâmetro x , representa uma das grandezas em estudo, isto é, pode representar o consumo de combustível (g), o consumo de energia (kWh) ou então a emissão de gases poluentes, sendo de realçar a emissão de CO_2 (g), a emissão de CO (g), a emissão de HC (g) e a emissão de NO_x (g). A média para cada modo de VSP, tendo em conta os parâmetros em estudo, x , é obtida com base nos ciclos de condução realizados e específica para cada veículo. No caso do regime CD, utilizaram-se os dois ciclos de condução disponíveis (SOC inicial máximo) para cada veículo sendo que, no caso do regime CS, utilizaram-se os quatro ciclos de condução para cada veículo.

Por fim, o cálculo do consumo energético e das emissões dos gases poluentes, tendo em conta a abordagem baseada no Método ABCD, é efetuado com base na média do parâmetro em estudo por modo VSP e de acordo com o tipo de propulsão B ou D. O cálculo resume-se à soma do somatório do produto entre a média por modo de VSP do parâmetro em estudo na zona de propulsão B (consumo de combustível, consumo de energia elétrica e emissões de gases poluentes), a percentagem de tempo nesse mesmo modo de VSP correspondente à

zona de propulsão B e o tempo total de viagem e do somatório do produto entre a média por modo de VSP do parâmetro em estudo na zona de propulsão D (consumo de combustível, consumo de energia elétrica e emissões de gases poluentes), a percentagem de tempo nesse mesmo modo de VSP correspondente à zona de propulsão D e o tempo total de viagem. Distinguindo-se assim o cálculo de acordo com o tipo de zona de propulsão em estudo, B ou D, e o regime em questão, regime CD ou regime CS, descrito pela equação 12 e 13, respetivamente.

$$x_{totalCD} = \left(\sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CD} \right)_B + \left(\sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CD} \right)_D \quad (12)$$

$$x_{totalCS} = \sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CS} \quad (13)$$

Nesta situação, à semelhança das duas abordagens anteriores, o parâmetro x , representa uma das grandezas em estudo, isto é, pode representar o consumo de combustível (g), o consumo de energia (kWh) ou então a emissão de gases poluentes, sendo de realçar a emissão de CO_2 (g), a emissão de CO (g), a emissão de HC (g) e a emissão de NO_x (g). A média para cada modo de VSP, tendo em conta os parâmetros em estudo, x , é obtida com base nos ciclos de condução realizados e específica para cada veículo, à semelhança da abordagem utilizada atualmente, sendo que neste caso, existe a distinção entre zonas, o que promove a necessidade de duas médias distintas e aferentes a cada zona. No caso do regime CD, utilizaram-se os dois ciclos de condução disponíveis (SOC inicial máximo) para cada veículo sendo que, no caso do regime CS, utilizaram-se os quatro ciclos de condução para cada veículo.

Apesar de ser possível comparar os resultados tendo em conta os cálculos realizados anteriormente, torna-se mais simples se as grandezas em questão forem apresentadas na sua forma mais comum. O consumo de combustível fóssil (CCF), apresenta-se geralmente em l/100 km, apesar de, através do cálculo realizado, o resultado obtido ser apresentado em gramas. Nesta situação a conversão pode ser resumida ao quociente do resultado obtido em kg (g_{fuel}) e a densidade do combustível utilizado (ρ_{fuel} , 0,720 kg/l para a gasolina num ambiente a 15°C), sendo posteriormente dividido pela distância total (d , km), tendo em conta o regime em causa, regime CD ou regime CS, e por fim multiplicado por 100, resultando

então na unidade pretendida l/100 km e como se pode verificar na equação 14 e 15, de acordo com o regime em estudo.

$$CCF(l/100km_{CD}) = \frac{\frac{g_{fuel_{CD}}}{\rho_{fuel}}}{d_{CD}} \times 100 \quad (14)$$

$$CCF(l/100km_{CS}) = \frac{\frac{g_{fuel_{CS}}}{\rho_{fuel}}}{d_{CS}} \times 100 \quad (15)$$

O consumo de energia elétrica (CEE), apresenta-se geralmente em kWh/100 km, apesar de, através do cálculo realizado, o resultado obtido ser apresentado em kWh. Nesta situação a conversão pode ser resumida ao quociente do resultado obtido em kWh (E) e a distância total (d , km), e posteriormente multiplicado por 100, resultando então na unidade pretendida kWh/100 km e como se pode verificar na equação 16.

$$CEE(kWh/100km_{CD}) = \frac{E}{d_{CD}} \times 100 \quad (16)$$

As emissões de gases poluentes (EP), apresentam-se geralmente em g_{gas}/km , apesar de, através do cálculo realizado, o resultado obtido ser apresentado em gramas. Nesta situação a conversão pode ser resumida ao quociente do resultado obtido em gramas (g_{gas}) e a distância total (d , km), resultando então na unidade pretendida g_{gas}/km , dependendo do gás em estudo, como se pode verificar na equação 17 e 18.

$$EP(g_{gas}/km_{CD}) = \frac{g_{gas_{CD}}}{d_{CD}} \quad (17)$$

$$EP(g_{gas}/km_{CS}) = \frac{g_{gas_{CS}}}{d_{CS}} \quad (18)$$

Terminando as conversões dos resultados obtidos através das diferentes abordagens, analisa-se e compara-se os resultados obtidos, permitindo aferir o desempenho do método desenvolvido e a sua precisão. Por outro lado, ainda é necessário efetuar o cálculo do UF tendo em conta as três abordagens, visto que se trata de um parâmetro capaz de conferir mais detalhe à análise das três abordagens, sendo este parâmetro essencial para a determinação da

performance energética e ambiental em contexto de certificação num veículo híbrido Plug-In.

2.2.5 – Avaliação do *Utility Factor*

A avaliação do UF surge na continuação do método indireto de predição do sistema de propulsão e da estimativa do consumo energético e das emissões dos gases poluentes, sendo mais um parâmetro que avalia o desempenho e a exatidão do método desenvolvido. Neste seguimento, além de se avaliar a exatidão da predição do método desenvolvido, ainda pode ser realizada uma comparação com a estimativa calculada através do Método VSP Padrão, possibilitando averiguar qual é capaz de estimar melhor o resultado e que melhor se aproxima da realidade, à semelhança do que se realizou com a estimativa do consumo energético e das emissões dos gases poluentes. O UF representa a proporção da distância do veículo percorrido em modo elétrico relativa à distância total como já foi referido anteriormente.

De acordo com a SAE J2841, o UF indica o limite de utilidade de um regime de operação inicial, que para os PHEVs, é o regime de CD [43]. Por outro lado, de acordo novamente com a SAE J2841, é possível ainda distinguir o tipo de UF, sendo que existe o UF de frota (FUF), o qual se descreve sendo um UF com base na distância total percorrida com uma frota específica de veículos, e o UF singular (IUF), o qual se descreve sendo um UF com a capacidade de assemelhar entre um tipo de veículos de acordo com uma resposta comum de consumo de combustível e de energia elétrica [43]. Nesta situação o cálculo do UF pode ser classificado como *Utility Factor* singular, visto que o presente estudo aborda diferentes veículos. Apesar do documento SAE J2841, apresentar a definição para o UF no caso de um veículo Plug-In Híbrido e apresentar a expressão de cálculo, é no documento SAE J1711 que se encontra descrito o processo de validação de um ciclo de condução e que tornam viável o UF obtido.

Neste sentido, em contexto de certificação em laboratório, o ciclo de condução encontra-se predefinido, contudo num ensaio RDE o ciclo de condução é variável. A definição do término do ensaio ao veículo incide essencialmente replicação de ciclos de condução e na variação de energia durante o ciclo, isto porque, para validar o ensaio realizado, deve haver a validação de pelo menos um dos critérios descritos na SAE J1711. O primeiro critério para

fechar a avaliação do ciclo e do veículo incide na variação do SOC durante o regime de CS, sendo que esta variação deve ser inferior a 2% da variação do SOC durante todo o ciclo de condução, pelo qual deve-se repetir o ciclo de condução ou o regime aferente ao regime de CS, até o critério de condução ser verificado [44], como se encontra descrito na Figura 18.

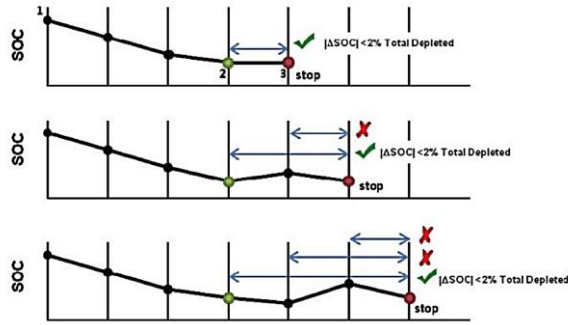


Figura 18- Primeiro critério de validação do ciclo de condução;[44]

De forma a facilitar a percepção do conceito, o cálculo do critério de avaliação pode ser feito de acordo com a equação 19, como se demonstra de seguida.

$$|\Delta SOC| = \left| \frac{\Delta SOC_{CS}}{\Delta SOC_{CD} + \Delta SOC_{CS}} \times 100 \right| < 2\% \text{ SOC Total Consumido} \quad (19)$$

O segundo critério incide sobre a energia gasta durante o regime de CS devendo esta ser inferior a 1% da energia gerada pela massa total de combustível consumido durante todo o ciclo de condução, e sendo novamente necessário repetir o ciclo de condução ou repetir o período aferente ao regime CS, até o critério ser verificado [44], como se encontra descrito na Figura 19.

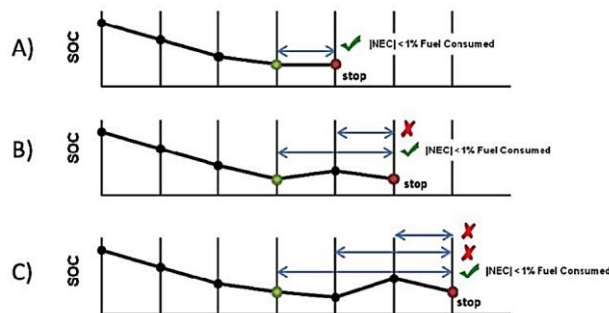


Figura 19-Segundo critério de validação do ciclo de condução;[37]

Neste caso, é descrito na norma SAE J1711, a equação de cálculo que permite determinar o parâmetro descrito na Figura 19, sendo esta a equação 20, demonstrada de seguida.

$$|NEC| = \frac{Net\ Energy\ Change}{Total\ Fuel\ Energy} = < 1\% \quad (20)$$

Definindo que ambos os veículos, armazenam a sua energia em baterias, o cálculo do “Net Energy Change” de acordo novamente com a norma SAE J1711, pode ser feito de acordo com a equação 21, como demonstra de seguida.

$$Net\ Energy\ Change = ((A.h)_{final} - (A.h)_{inicial}) \times V_{sistema} \quad (21)$$

A primeira equação descreve a variação de energia durante o período de CS, através da subtração do produto entre a tensão no sistema ($V_{sistema}$) e a corrente final ($(A.h)_{final}$) e inicial ($(A.h)_{inicial}$). Devido à necessidade de equipamentos extra e os perigos inerentes à recolha desta informação, estes dados não foram recolhidos durante o ciclo de condução embora, existe conhecimento da energia debitada em cada instante, isto é, sabendo que o produto da tensão pela corrente, resulta em energia, pode-se modificar a equação 21 de modo adaptar-se aos dados existentes, como se verifica na equação 22. Ainda assim existe a necessidade de converter a energia em kWh para Joules de modo a existir unanimidade das unidades, logo aplica-se o fator de conversão correspondente a $3,6 \times 10^6\ J/kWh$.

$$Net\ Energy\ Change = (SOC_{final} - SOC_{inicial})_{CS} \times 3,6 \times 10^6 \quad (22)$$

O cálculo do “Total Fuel Energy” de acordo com a norma SAE J1711, pode ser feito de acordo com a equação 23, como demonstra de seguida e conhecendo que o poder calorífico inferior (PCI) da gasolina convencional é de 42,5 MJ/kg [45].

$$Total\ Fuel\ Energy = PCI \times m_{fuel} \quad (23)$$

Posto isto, o cálculo do segundo critério de validação pode ser feito tendo por base a equação 24, que contém as simplificações demonstradas anteriormente.

$$|NEC| = \frac{(SOC_{final} - SOC_{inicial})_{CS} \times 3,6 \times 10^6}{43,5 \times 10^6 \times m_{fuel}} = < 1\% \quad (24)$$

Tendo efetuado ambos os critérios de validação, necessitando apenas de aprovação em um, o cálculo do UF, de acordo com a SAE J2841, pode ser descrito como o quociente da

distância percorrida pelo veículo durante o regime de CD e a distância total percorrida pelo veículo [43], sendo esta relação verificada na equação 25.

$$UF(R_{CD}) = \frac{\min(d, R_{CD})}{d_{total}} = \frac{d_{CD}}{d_{total}} \quad (25)$$

Posto isto, com o cálculo do UF realizado, o processo metodológico encontra-se completo, o que permite com base na análise e comparação dos resultados provenientes das três abordagens, aferir o desempenho do método desenvolvido e a sua precisão, tendo por base a utilização de sete parâmetros quando comparado com os restantes resultados provenientes das outras abordagens.

Capítulo 3 – Resultados e Aplicações

No seguimento da realização do presente trabalho, existe a necessidade de aferir com base em resultados as premissas definidas inicialmente nos objetivos, conferindo ao presente trabalho uma componente científico-experimental viável. Assim sendo, tendo por base o procedimento metodológico, estabeleceu-se que a disposição dos resultados obtidos pode ser dividida em três partes, sendo estas, a estimativa do consumo elétrico, diferenciação por zonas com base no Método ABCD e os impactos ao nível de consumo e emissões e por fim, a análise de ciclos de condução reais.

3.1 – Estimativa do Consumo Elétrico

O método indireto de previsão do consumo de energia elétrica permite estimar o SOC em cada instante, atendendo à relação entre a variação do SOC e o VSP num intervalo de tempo específico e tendo em consideração o estado de funcionamento do motor térmico. Apesar de não ser demonstrado o cálculo do parâmetro VSP foi realizado previamente em cada instante do ciclo de condução e alocado no modo de VSP característico, recorrendo às condicionantes presentes na Tabela 2. Posto isto, com base na relação obtida, modela-se a curva do SOC ao longo do regime em estudo, atendendo ao tipo de propulsão em uso em cada instante. O método em questão, desenvolve abordagens que são específicas para cada veículo, pelo qual os resultados estão dispostos de forma separada.

3.1.1 – Veículo A

Atendendo às premissas descritas ao longo do procedimento metodológico, deve-se ter inicialmente em consideração o regime em estudo, ou seja, conhecer os limites do regime de CD e do regime de CS. Tratando-se do veículo A, sabe-se que o regime de CD, termina quando o SOC atinge os 10% de capacidade, e no qual se inicia o regime de CS. Este valor, foi determinado com base na análise gráfica gerada a partir dos dados recolhidos através da porta de diagnóstico OBD, e no qual se verifica que, atingindo os 10% de capacidade de bateria, o SOC oscila aproximadamente em torno de um valor constante, como se demonstra na Figura 20. Através de uma análise gráfica mais detalhada, determina-se o instante em concreto no qual se atinge a capacidade de 10% de bateria, sendo que para a viagem 1 foi ao segundo 4300 e na viagem 2 foi ao segundo 3400, mais uma vez visível na Figura 20.

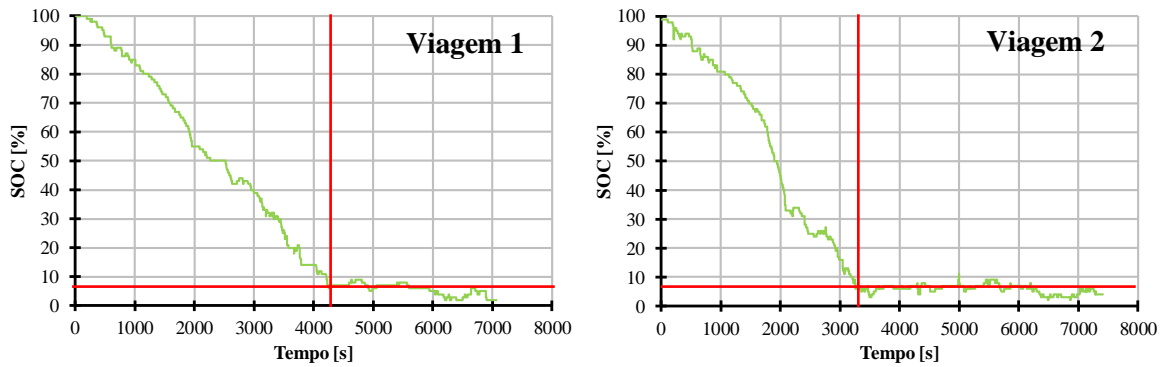


Figura 20-Variação do SOC medido durante a viagem 1 e 2, com a respetiva identificação do termino do regime de CD e inicio do regime de CS;

Com a identificação do instante no qual termina o regime de CD e inicia-se o regime de CS, pode-se iniciar o cálculo da estimativa tendo em conta o método indireto e tendo em conta o Método VSP Padrão.

- **Método Indireto (Regime CD)**

A aplicação do método indireto inicia-se com a análise dos dados recolhidos, mais propriamente recolhem-se os pontos resultantes da relação da variação do SOC sobre um intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, atendendo ao tipo de regime e ao estado de funcionamento do motor térmico ($\text{rpm}=0$ e $\text{rpm}\neq 0$). Pode ser obtido dois tipos de pontos, quando o ponto resultante possui um valor de $\Delta\text{SOC}/\text{tempo}$ positivo então ocorre regeneração de energia, consistente com um valor de VSP negativo. Por outro lado, quando o ponto resultante é caracterizado por $\Delta\text{SOC}/\text{tempo}$ negativo então ocorre consumo de energia, consistente com um valor de VSP positivo. É espectável que quando o motor térmico se encontra em funcionamento ocorra a condição de regeneração de energia, mas devido à escassez de pontos no qual o motor térmico se encontra em funcionamento, esta condição não é visível. Posto isto, pode-se observar na Figura 21 as retas tendências otimizadas que melhor aproximam a variação do SOC.

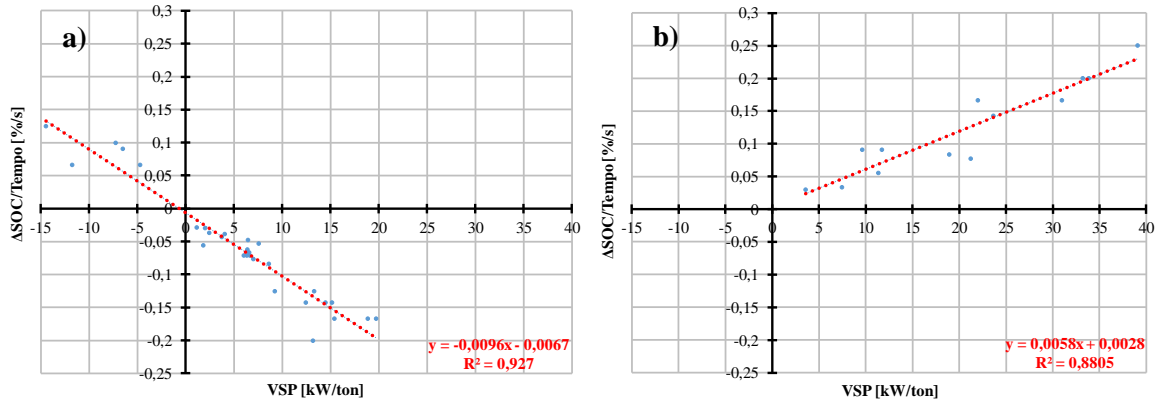


Figura 21- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o método indireto, regime de CD. a) RPM = 0; b) RPM ≠ 0);

Com base nos resultados obtidos na Figura 21, é necessário agora aplicar a métrica desenvolvida que permite, alocar cada reta tendência em cada instante de acordo com a situação em questão (Consumo, regeneração ou Ausência de Consumo e Regeneração de Energia Elétrica). Neste sentido, demonstra-se na Figura 22 a curva que relaciona o consumo médio de combustível com o modo VSP em cada instante e as áreas aferentes a cada situação, o que permite estabelecer qual a equação que deve ser aplicada para se estimar o SOC em cada instante.

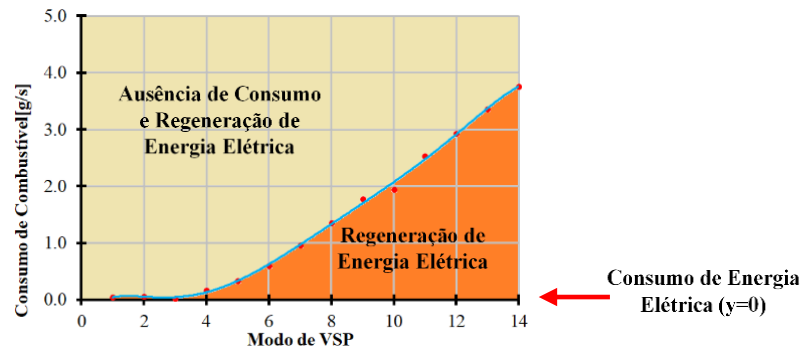


Figura 22- Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação no veículo A (Consumo, Regeneração e Ausência de Consumo e Regeneração de Energia Elétrica);

Desta forma, com base nos resultados provenientes da Figura 21 e Figura 22, é agora possível reescrever as equações 3, 4 e 5, aplicáveis ao veículo em estudo, dando lugar então às equações 26, 27 e 28, tendo em atenção que os valores referentes ao declive e ao coeficiente linear devem ser apresentados na sua forma positiva, dado que o valor negativo é devido à forma como este é representado graficamente.

$$\text{Consumo de energia elétrica} \quad SOC_k = SOC_{k-1} - (y)_{(rpm \neq 0)} \rightarrow SOC_{k-1} - (0.0096 \times VSP_k + 0.0067) \quad (26)$$

$$\text{Regeneração de energia elétrica} \quad SOC_k = SOC_{k-1} + (y)_{(rpm \neq 0)} \rightarrow SOC_{k-1} + (0.0058 \times VSP_k + 0.0028) \quad (27)$$

$$\begin{array}{l} \text{Ausência de Consumo e Regeneração} \\ \text{de Energia Elétrica} \end{array} \quad SOC_k = SOC_{k-1} \quad (28)$$

Tendo por base as equações 26, 27 e 28 e o valor calculado de VSP para cada instante, torna-se possível obter a estimativa da variação do SOC ao longo da viagem durante o regime CD e comparar com o resultado do SOC medido ao longo da viagem, como se demonstra na Figura 23. Pode ser observado que a estimativa em geral segue o padrão do SOC medido, apesar de se verificarem algumas discrepâncias na segunda viagem, justificadas pelo uso do motor térmico no princípio da viagem. Uma forma rápida para se colmatar este problema seria, realizar uma terceira viagem, por forma a obter mais pontos, podendo estimar a variação do SOC quando o motor térmico se encontra ligado com mais precisão. Ainda assim, apesar de demonstrar algumas diferenças a presente abordagem permite obter resultados com maior resolução quando comparado com os resultados recolhidos (Variação de 1 Hz). Não se realizou a calibração com uma viagem e posteriormente o teste na outra viagem devido a não existir variabilidade suficiente consequência da amostra reduzida.

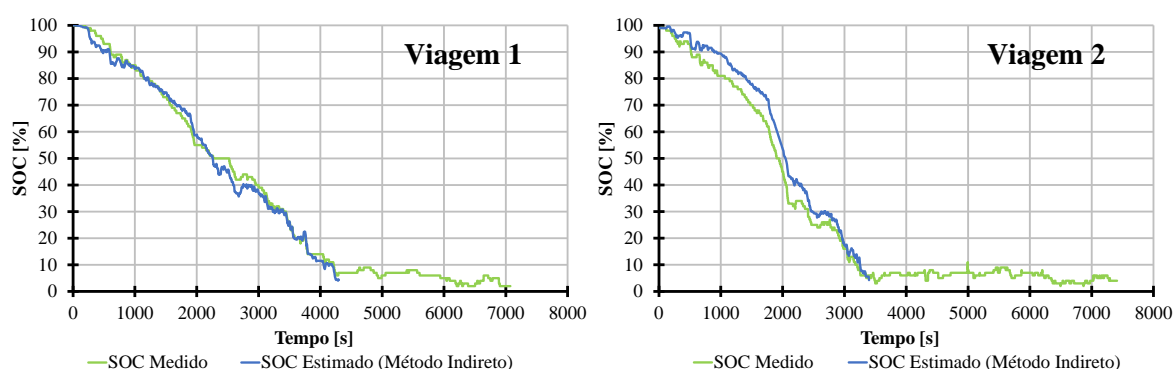


Figura 23- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método Indireto, regime de CD);

Por outro lado, apesar da representação gráfica permitir verificar uma boa aproximação, é através da construção de uma curva que relaciona a estimativa calculada com o valor medido que afere com certeza a exatidão do método. Tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 24 providencia a correlação entre a o SOC estimado e o SOC medido, indicando uma boa correlação ($R^2 > 0.98$) e um declive da reta muito perto de 1,

assemelhando-se a uma reta do tipo $y=x$, como seria de esperar. Este resultado permite aferir que o método desenvolvido é capaz de providenciar um resultado bastante razoável e aproximado da realidade, durante o regime de CD.

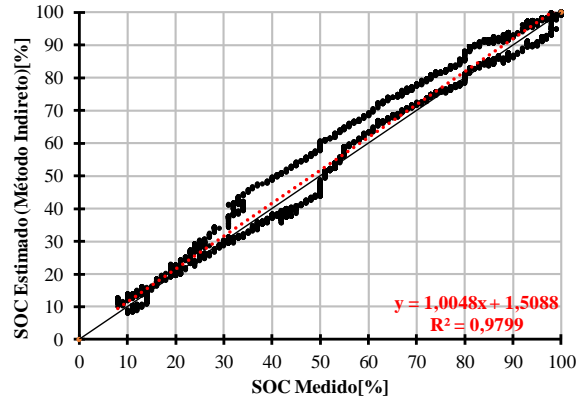


Figura 24- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do método indireto para as duas viagens realizadas (regime de CD);

- **Método VSP Padrão (Regime CD)**

Por outro lado, tendo em atenção ainda o regime de CD, mas aplicando o Método VSP Padrão, sabe-se que a coleta de pontos é feita não havendo diferenciação do estado de funcionamento do motor, ou seja, a construção da reta tendência é realizada com base em todos os pontos utilizados anteriormente mas agora sem distinção como se visualiza na Figura 25 , sendo que a tipologia dos pontos se mantém, isto é, quando o ponto resultante é caracterizado por $\Delta SOC/\text{tempo}$ positivo então ocorre regeneração de energia, sendo este resultado consistente com um valor de VSP negativo, por outro lado quando o ponto resultante é caracterizado por $\Delta SOC/\text{tempo}$ negativo então ocorre consumo de energia, sendo este resultado consistente com um valor de VSP positivo.

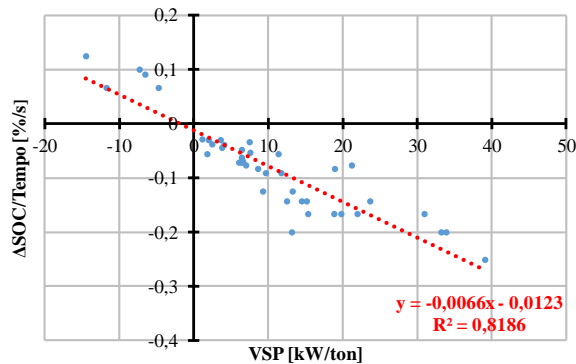


Figura 25- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o Método VSP Padrão;

Desta forma, com base nos resultados provenientes da Figura 25, é agora possível reescrever a equação 6, aplicável ao veículo em estudo, dando lugar então à equação 29, tendo em atenção que os valores referentes ao declive e ao coeficiente linear devem ser apresentados na sua forma positiva, dado que o valor negativo é devido à forma como este é representado graficamente.

$$SOC_k = SOC_{k-1} - y \rightarrow SOC_{k-1} - (0.0066 \times VSP_k + 0.0123) \quad (29)$$

Tendo por base a equação 29 e o valor calculado do parâmetro VSP para cada instante, torna-se possível obter a estimativa da variação do SOC ao longo da viagem durante o regime de CD e comparar com o resultado do SOC medido ao longo da viagem, como se demonstra na Figura 26.

Neste caso, observa-se que em ambas as viagens, a estimativa em geral segue o padrão do SOC medida apesar de quando se aproxima do fim do regime de CD, a estimativa dispersa-se. Esta dispersão é justificada pelo facto do método utilizado não ser sensível ao tipo de propulsão em uso em cada instante o que leva a não considerar a regeneração de energia elétrica ou mesmo instantes neutros, no qual a locomoção do veículo se deve apenas ao uso do motor térmico. O método em causa, devido à sua insensibilidade pode demonstrar um melhor desempenho na análise de veículos com apenas uma fonte de propulsão. Apesar de demonstrar uma discrepância a presente abordagem consegue ainda obter resultados com maior resolução quando comparado com os resultados recolhidos (Variação de 1 Hz).

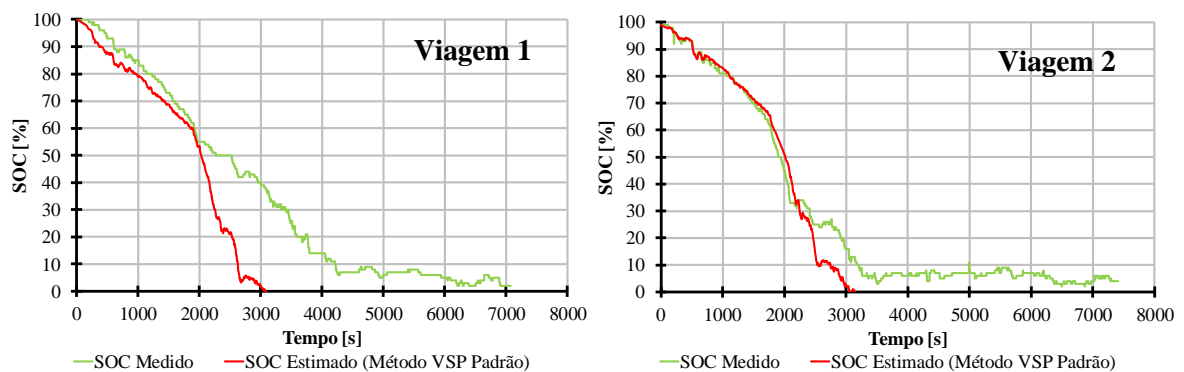


Figura 26- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CD);

Á semelhança da comparação feita anteriormente, tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 27 providencia a correlação entre o SOC estimado através do Método VSP Padrão e o SOC medido, apesar de indicar uma correlação razoável ($R^2 > 0.90$) o um

declive da reta não se encontra perto de 1, resultando numa reta diferente do tipo $y=x$, como seria de esperar.

Estes resultados, permitem aferir que o Método VSP Padrão é capaz de providenciar um resultado bastante razoável no princípio do ciclo da condução, no qual existe uma predominância do uso do motor elétrico sendo que para o fim do regime de CD, como o uso do motor térmico é mais frequente a estimativa deixa de apresentar uma boa exatidão, o que reflete numa má aproximação da realidade. Sendo o problema de baixa exatidão comum em ambas a viagem, aumentar o número de pontos pode não ser solução, visto que o método é insensível à alteração dos modos de propulsão.

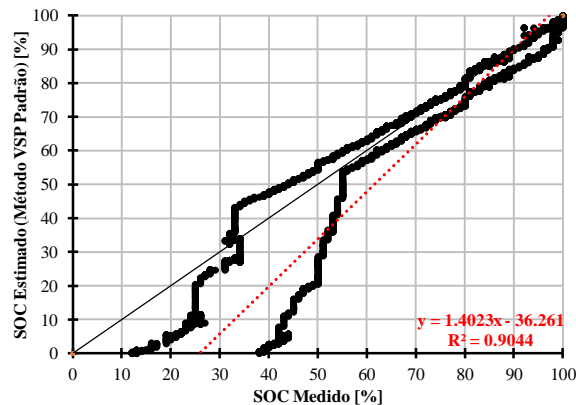


Figura 27- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD);

- **Método VSP Padrão (Regime CS)**

Atendendo agora ao regime de CS, verifica-se que existem poucos pontos que caracterizam a variação do SOC, visto que, existe um uso mais frequente do motor térmico, sendo benéfico aplicar-se o Método VSP Padrão, não existindo diferenciação na recolha de pontos para obtenção da reta que origina a variação de SOC em função do VSP.

A construção da reta tendência baseou-se no uso das quatro viagens, sendo que, duas destas possuem apenas o regime de CS devido ao SOC baixo inicial. Pode-se observar na Figura 27 a reta tendência otimizada que melhor aproxima a variação do SOC, sendo de notar que os valores de $\Delta SOC/\text{tempo}$ são de uma grandeza reduzida, o que indica uma variação do SOC reduzida.

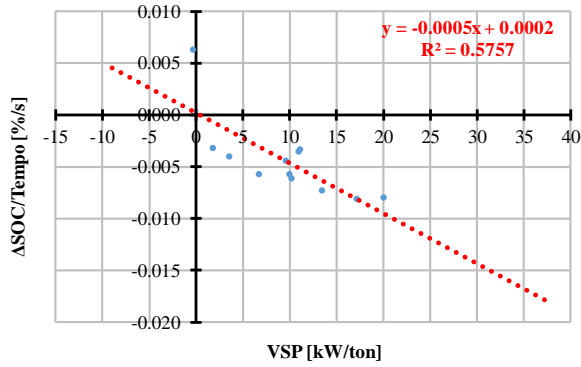


Figura 28-Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, regime CS;

Desta forma, com base nos resultados provenientes da Figura 28, é agora possível reescrever a equação 7, aplicável ao veículo em estudo, dando lugar então à equação 30, tendo em atenção que os valores referentes ao declive e ao coeficiente linear devem ser apresentados na sua forma positiva, dado que o valor negativo é devido à forma como este é representado graficamente.

$$SOC_k = SOC_{k-1} - y \rightarrow SOC_{k-1} - (0.0005 \times VSP_k - 0.0002) \quad (30)$$

Tendo por base a equação 30 e o valor calculado do parâmetro VSP para cada instante, torna-se possível obter a estimativa da variação do SOC ao longo da viagem durante o regime de CS e comparar com o resultado do SOC medido ao longo da viagem, como se demonstra na Figura 29.

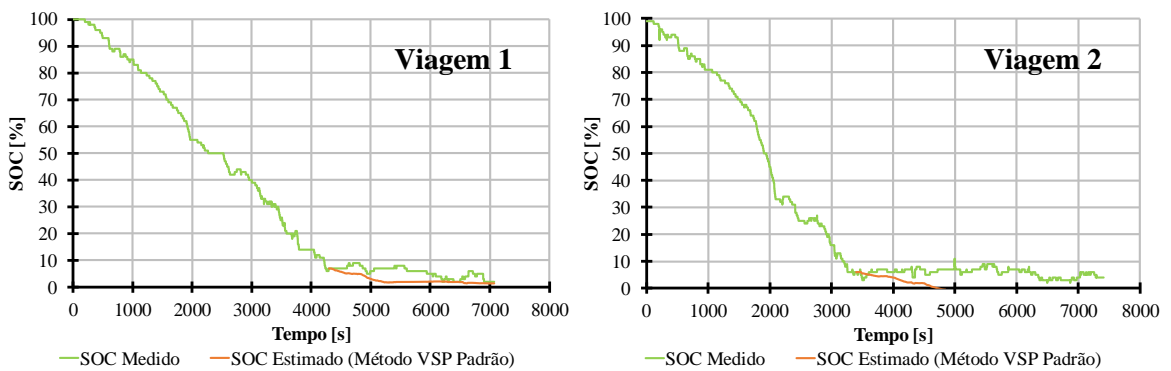


Figura 29- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CS);

Pode ser observado que a estimativa apresenta discrepâncias em relação ao SOC medido, justificado pela escassez de pontos e devido à abordagem em causa não demonstrar

sensibilidade alguma à alteração de fontes de propulsão, apesar de, na primeira viagem se obter uma curva razoável, o que não aconteceu na segunda viagem.

Por outro lado, através da construção da curva que relaciona a estimativa calculada com o valor medido que afere com certeza a baixa exatidão do método e tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 30 providencia a correlação entre o SOC estimado e o SOC medido, indicando uma fraca correlação ($R^2 > 0,06$) e um declive de reta diferente do que seria esperado, ou seja, muito perto de 1, assemelhando-se a uma reta do tipo $y=x$. Estes resultados, permitem aferir mais uma vez, que o Método VSP Padrão apresenta resultados pouco exatos quando existe a utilização de duas fontes de propulsão.

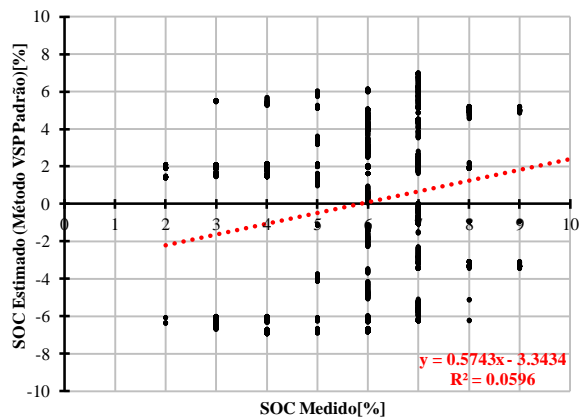


Figura 30- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD);

3.1.2 – Veículo B

Atendendo agora ao Veículo B, repete-se todo o procedimento metodológico executado anteriormente para o Veículo A. Inicialmente são identificados os limites do regime de CD e do regime de CS, sendo que para este caso o regime CD termina quando o SOC atinge os 15% de capacidade. Este valor, foi determinado com base na análise gráfica gerada a partir dos dados recolhidos, no qual se verifica que atingindo os 15% de capacidade de bateria, o SOC mantém uma evolução constante, equivalente a uma reta linear de declive nulo, como se demonstra Figura 31. Através de uma análise mais detalhada, determina-se o instante em concreto no qual se atinge a capacidade de 15% de bateria, sendo que para a viagem 1 foi ao segundo 3400 e na viagem 2 foi ao segundo 3300, mais uma vez visível na Figura 31.

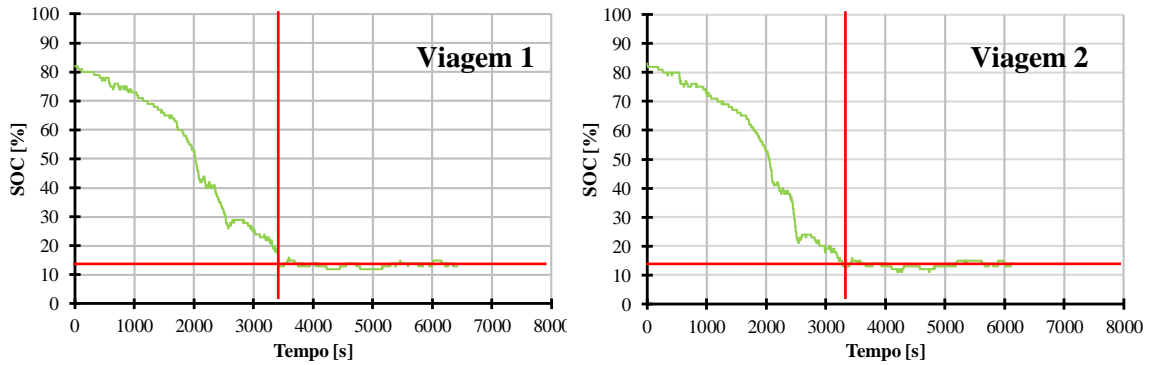


Figura 31-Varição do SOC medido durante a viagem 1 e 2, com a respetiva identificação do termino do regime de CD e inicio do regime de CS;

Com a identificação do instante no qual termina o regime de CD e se inicia o regime de CS, pode-se iniciar o cálculo da estimativa tendo em conta o método indireto e tendo em conta o Método VSP Padrão.

- **Método Indireto (Regime CD)**

À semelhança do veículo A, a aplicação do método indireto, inicia-se com a análise dos dados recolhidos, mais propriamente, coleta-se os pontos resultantes da relação da variação do SOC sobre um intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, atendendo ao tipo de regime e ao estado de funcionamento do motor térmico ($rpm=0$ e $rpm \neq 0$). Posto isto, pode-se observar na Figura 32 as retas tendências que melhor aproximam a variação do SOC.

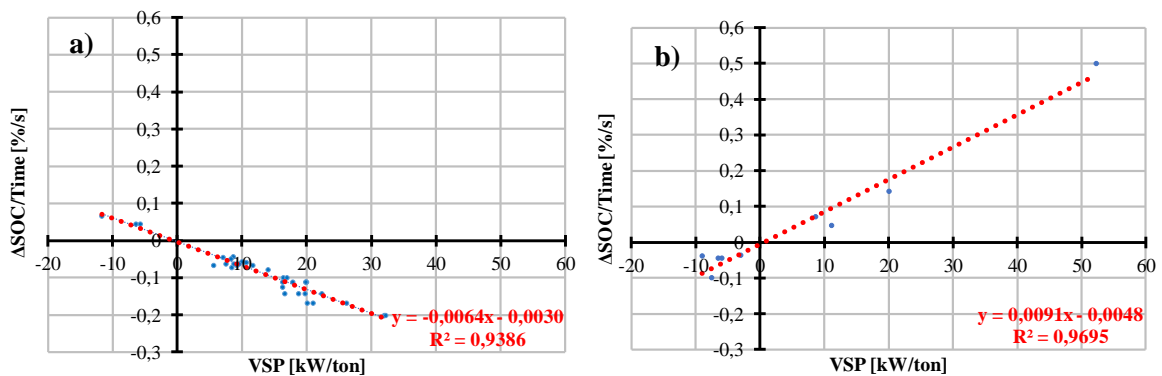


Figura 32- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o método indireto, regime de CD. a) RPM = 0; b) RPM ≠ 0;

Com base nos resultados obtidos na Figura 32, aplica-se novamente a métrica desenvolvida que permite, alocar cada reta tendência em cada instante de acordo com a situação em questão (Consumo, Regeneração ou Ausência de Consumo e Regeneração de Energia

Elétrica). À semelhança do Veículo A, demonstra-se na Figura 33 a curva que relaciona o consumo médio de combustível com o modo VSP em cada instante e as áreas aferentes a cada situação específica para o Veículo B, o que permite definir as equações a aplicar para se estimar o SOC em cada instante.

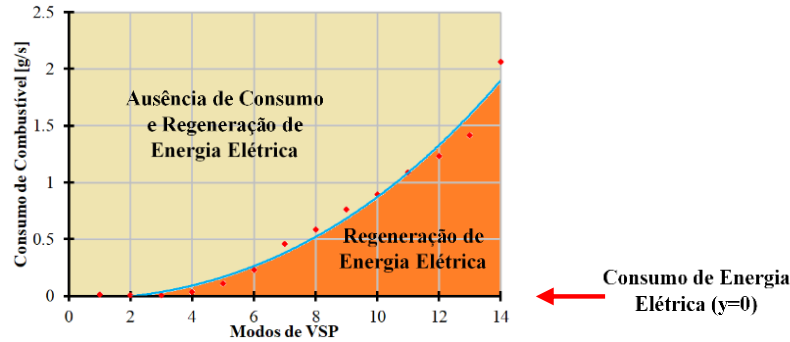


Figura 33- Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação (Consumo, Regeneração e Ausência de Consumo e Regeneração de Energia Elétrica);

Desta forma, com base nos resultados provenientes da Figura 32 e Figura 33, é agora possível reescrever as equações 3, 4 e 5, aplicáveis ao veículo B, dando lugar então às equações 31, 32 e 33, tendo em atenção que os valores referentes ao declive e ao coeficiente linear devem ser apresentados na sua forma positiva, dado que o valor negativo é devido à forma como este é representado graficamente.

$$\text{Consumo de energia elétrica} \quad SOC_k = SOC_{k-1} - (y)_{(rpm \neq 0)} \rightarrow SOC_{k-1} - (0.0064 \times VSP_k + 0.0030) \quad (31)$$

$$\text{Regeneração de energia elétrica} \quad SOC_k = SOC_{k-1} + (y)_{(rpm \neq 0)} \rightarrow SOC_{k-1} + (0.0083 \times VSP_k + 0.0119) \quad (32)$$

$$\begin{array}{l} \text{Ausência de Consumo e} \\ \text{Regeneração de Energia Elétrica} \end{array} \quad SOC_k = SOC_{k-1} \quad (33)$$

Tendo por base as equações 31, 32 e 33 e o valor calculado do parâmetro VSP para cada instante, torna-se possível obter a estimativa da variação do SOC ao longo da viagem durante o regime de CD e comparar com o resultado do SOC medido ao longo da viagem, como se demonstra na Figura 34. À semelhança do veículo A, a estimativa do SOC do veículo B em geral segue o padrão do SOC medido, apesar de se verificarem ligeiras discrepâncias, justificadas pelo uso do motor térmico no princípio da viagem. Podem ser realizadas mais viagens por forma aumentar o número de pontos coletados e assim otimizar a relação da

variação do SOC (Figura 32). A presente abordagem permite obter resultados com maior resolução quando comparados com os resultados recolhidos (Variação de 1 Hz).

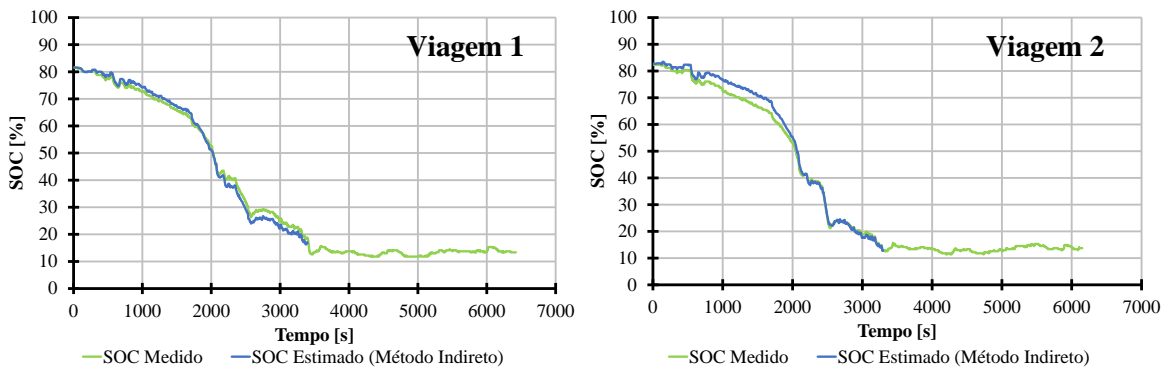


Figura 34- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método Indireto, regime de CD);

A exatidão do método analisa-se através da construção de uma curva que relaciona a estimativa calculada do SOC com o valor medido. Tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 35 providencia a correlação entre o SOC estimado e o SOC medido, indicando um boa correlação ($R^2 > 0.99$) e um declive da reta muito próximo de um, assemelhando-se a uma reta do tipo $y=x$, à semelhança do Veículo A. Estes resultados, permitem aferir que o método desenvolvido é capaz de providenciar um resultado bastante razoável e bastante aproximado da realidade, durante o regime de CD.

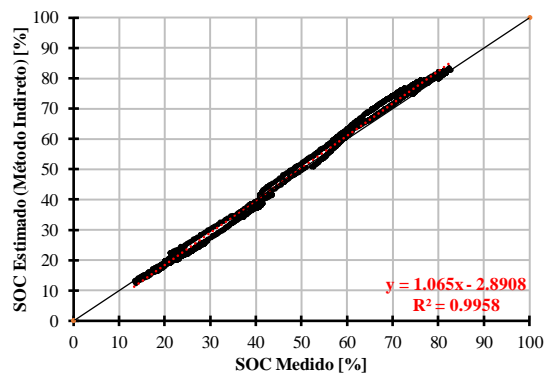


Figura 35- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do método indireto para as duas viagens realizadas (regime de CD);

- **Método VSP Padrão (Regime CD)**

Repetindo de novo todo o processo, mas aplicando o Método VSP Padrão, a recolha de pontos é feita não havendo diferenciação do estado de funcionamento do motor, ou seja, a construção da reta tendência é realizada com base em todos os pontos utilizados anteriormente mas agora sem distinção como se visualiza na Figura 36. A tipologia dos

pontos mantêm-se, isto é, quando o ponto resultante caracteriza uma situação de regeneração de energia ($VSP < 0$), e quando o ponto resultante caracteriza uma situação de consumo de energia ($VSP > 0$).

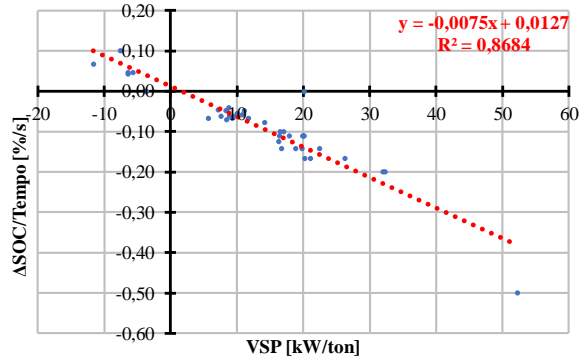


Figura 36- Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, tendo por base o Método VSP Padrão;

Desta forma, com base nos resultados provenientes da Figura 36, é agora possível reescrever a equação 6, aplicável ao veículo B, dando lugar então à equação 34, tendo em atenção que os valores referentes ao declive e ao coeficiente linear devem ser apresentados na sua forma positiva, dado que o valor negativo é devido à forma como este é representado graficamente.

$$SOC_k = SOC_{k-1} - y \rightarrow SOC_{k-1} - (0.0075 \times VSP_k + 0.0127) \quad (34)$$

Tendo por base a equação 34 e o valor calculado do parâmetro VSP para cada instante, torna-se possível obter a estimativa da variação do SOC ao longo da viagem durante o regime de CD e comparar com o resultado do SOC medido ao longo da viagem, como se demonstra na Figura 37.

Neste caso, observa-se que em ambas as viagens, a estimativa dispersa-se do SOC medido sendo que, quando se aproxima dos 3500 s de viagem existe uma descarga rápida associada a valores de VSP mais elevados devido à condução em autoestrada (situação de maior velocidade). Mais uma vez à semelhança do Veículo A devido ao método utilizado não ser sensível ao tipo de propulsão em uso em cada instante a estimativa obtida quando comparado com a realidade apresenta um desempenho razoável.

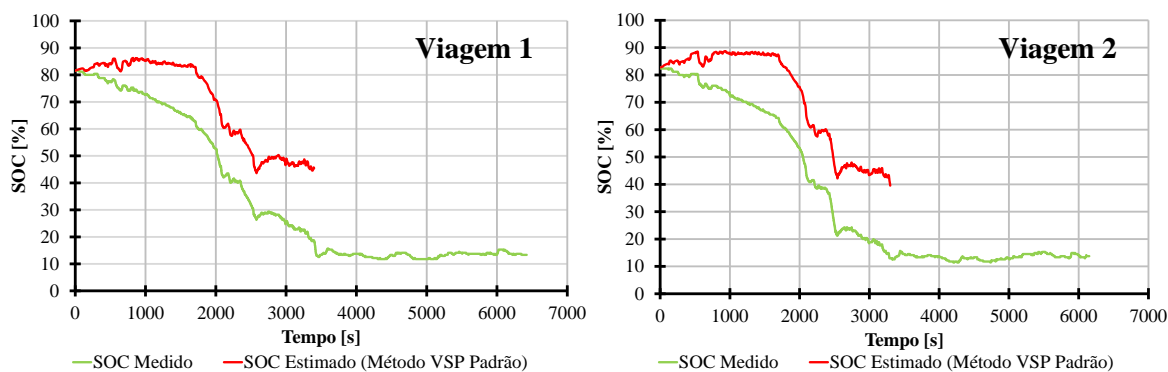


Figura 37- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CD);

À semelhança da comparação feita anteriormente, tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 38 providencia a correlação entre o SOC estimado através do Método VSP Padrão e o SOC medido, apesar de indicar uma correlação razoável ($R^2 > 0.93$), o declive da reta não se encontra perto de um, resultando numa reta diferente do tipo $y=x$.

O Método VSP Padrão é capaz de providenciar um resultado bastante razoável no princípio do ciclo da condução, sendo que ao longo do ciclo de condução, começa a existir uma alternância entre as fontes de propulsão mais frequente, afetando a exatidão da estimativa, como já se tinha verificado na análise do Veículo A.

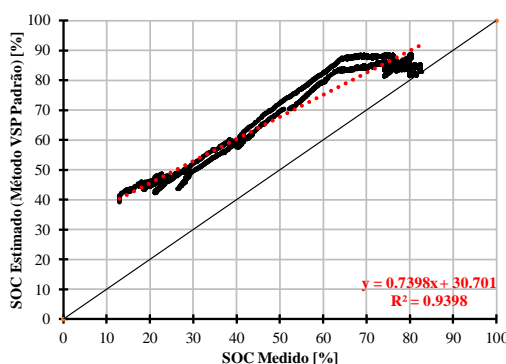


Figura 38- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD);

- **Método VSP Padrão (Regime CS)**

Atendendo agora ao regime de CS, mas tendo em análise o Veículo B, verifica-se novamente que existem poucos pontos que caracterizam a variação do SOC, pelo qual aplica-se à semelhança do Veículo A, o Método VSP Padrão, e no qual se manteve as condições (quatro viagens) para a construção da reta tendência. Pode-se observar na Figura 39 a reta tendência

que melhor aproxima a variação do SOC, no qual se nota novamente um Δ SOC/tempo de grandeza reduzida o que indica uma variação do SOC reduzida.

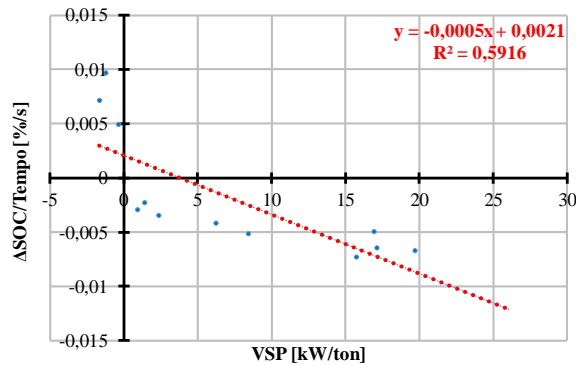


Figura 39-Linha tendência entre a variação do SOC sobre o intervalo de tempo e o valor médio de VSP nesse mesmo intervalo, regime CS;

Desta forma, com base nos resultados provenientes da Figura 39 é agora possível reescrever a equação 7, aplicável ao veículo em estudo, dando lugar então à equação 35, tendo em atenção que os valores referentes ao declive e ao coeficiente linear devem ser apresentados na sua forma positiva, dado que o valor negativo é devido à forma como este é representado graficamente.

$$SOC_k = SOC_{k-1} - y \rightarrow SOC_{k-1} - (0.0005 \times VSP_k - 0.0021) \quad (35)$$

Tendo por base a equação 35 e o valor calculado do parâmetro VSP para cada instante, torna-se possível obter a estimativa da variação do SOC ao longo da viagem durante o regime de CS e comparar com o resultado do SOC medido ao longo da viagem, como se demonstra na Figura 40.

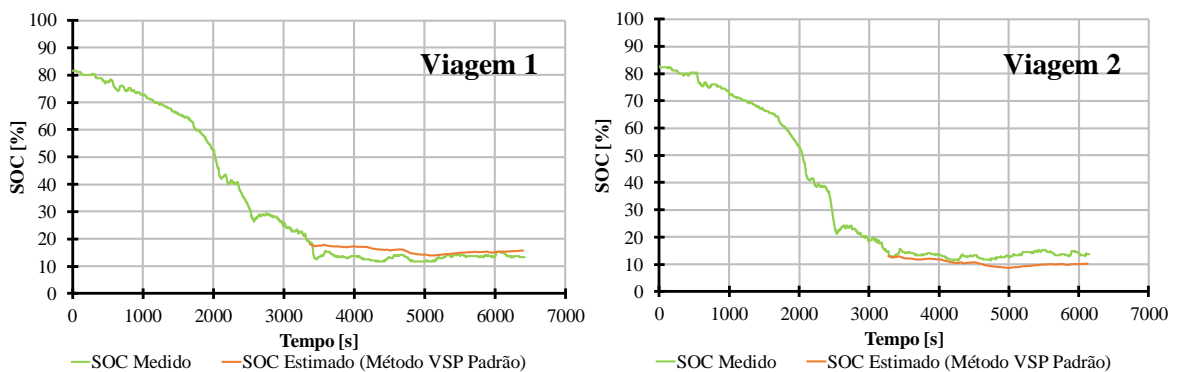


Figura 40- Aproximação do SOC em diferentes viagens (Método VSP Padrão, regime de CS);

Pode ser observado que a estimativa apresenta discrepâncias em relação ao SOC medido, justificado pela escassez de pontos e devido à abordagem em causa não demonstrar sensibilidade alguma à alteração das fontes de propulsão.

Tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 41 providencia a correlação entre o SOC estimado e o SOC medido, indicando uma fraca correlação ($R^2 > 0,001$) e um declive de reta diferente do que seria esperado, ou seja, muito perto de 1, assemelhando-se a uma reta do tipo $y=x$. Estes resultados, permitem aferir mais uma vez, que o Método VSP Padrão apresenta resultados pouco exatos quando existe a utilização de duas fontes de propulsão, apesar de, neste caso a estimativa mantém-se na ordem de grandeza durante todo o regime de CS, sendo um ponto positivo a realçar.

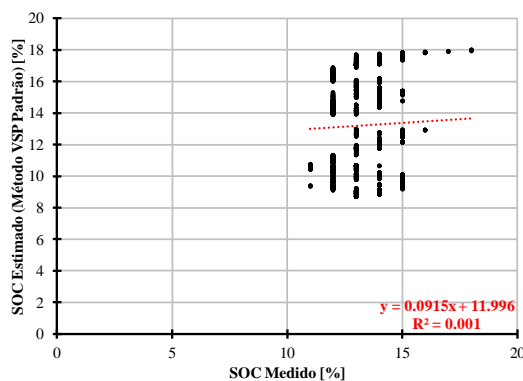


Figura 41- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado para as duas viagens realizadas;

3.2 – Diferenciação por zonas (impactos ao nível do consumo e emissões)

De um modo geral, a diferenciação por zonas dos modos de propulsão de um veículo híbrido plug-in, deverá permitir obter uma análise mais rigorosa e detalhada quando comparados com a realidade, no qual é realizado uma medição direta, o que incrementa a dificuldade de realização dos testes agregado à complexidade da montagem dos equipamentos, mas como também ao perigo elétrico associado. Posto isto, a possibilidade de implementar um algoritmo genérico indireto, baseado num ciclo de condução dotado de um perfil topográfico e dinâmico (velocidade), seria benéfico do ponto de vista de conhecer o tipo de propulsão em uso em cada instante, mas também pelo facto de manter a simplicidade da realização ensaio em condições reais de utilização.

O método em questão, ABCD, é desenvolvido de modo a colmatar este problema, apenas no regime de CD, tratando-se de um algoritmo genérico com resultados comparáveis com a

realidade, através da alocação dos modos de propulsão, ao nível de consumo energético, emissões de gases poluentes e UF, sendo que para este três últimos parâmetros, a comparação pode ser alargada também aos resultados provenientes do Método VSP Padrão. Desta forma, expõe-se os resultados obtidos para cada veículo tendo em conta as grandezas assinaladas como forma de validação do desempenho.

3.2.1 – Veículo A

A alocação dos pontos de acordo com as condições reais, segue as condições limitantes representadas na Tabela 4, sendo que é principalmente através do consumo de combustível e da velocidade que as zonas são definidas. Através da Figura 42, visualiza-se a definição das zonas com base na curva que relaciona o consumo de combustível médio e os modos de VSP, à semelhança da representação gráfica realizada referentes às zonas de consumo elétrico (Figura 22).

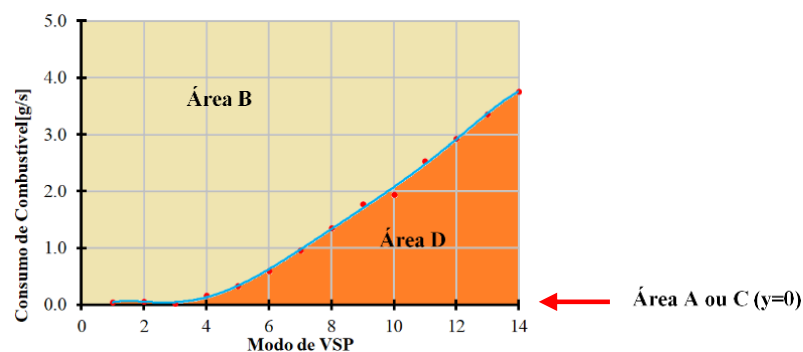


Figura 42-Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação específicas para Veículo A (Zona A, Zona B, Zona C e Zona D);

Tendo todos os pontos caracterizados, recorrendo às condições limitantes reais (Tabela 4) e recorrendo às condicionantes do algoritmo ABCD (Tabela 5), apresenta-se na Tabela 6 e na Tabela 7 a contagem dos pontos reais em cada zona de propulsão, a contagem dos pontos obtidos através do algoritmo em cada zona de propulsão, a contagem dos pontos obtidos através do algoritmo que se encontram bem alocados e por fim a percentagem de acerto, sendo específico para cada viagem, respetivamente.

Tabela 6- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 1, Veículo A);

Tipo de Propulsão	Viagem 1				Pontos alocados corretamente	Percentagem de Acerto [%]
	Alocação dos Pontos (Real)		Alocação dos Pontos (Algoritmo ABCD)			
Zona A	392	(9%)	392	(9%)	392	100,00
Zona B	765	(18%)	647	(15%)	383	50,07
Zona C	2970	(69%)	2800	(65%)	2572	86,60
Zona D	171	(4%)	459	(11%)	80	46,78
Não Alocados	-	-	-	-	871	20,27
Total	4298	(100%)	4298	(100%)	3427	79,73

Tabela 7- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 2, Veículo A);

Tipo de Propulsão	Viagem 2				Pontos alocados corretamente	Percentagem de Acerto [%]
	Alocação dos Pontos (Real)		Alocação dos Pontos (Algoritmo ABCD)			
Zona A	373	(11%)	373	(11%)	373	100,00
Zona B	399	(12%)	338	(10%)	150	37,59
Zona C	2490	(73%)	2340	(69%)	2195	88,15
Zona D	135	(4%)	346	(10%)	72	53,33
Não Alocados	-	-	-	-	607	17,87
Total	3397	(100%)	3397	(100%)	2790	82,13

Pode ser observado na Tabela 6, referente à viagem 1 que, de acordo com as condicionantes reais, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 69% da viagem, seguida da Zona B (motor térmico apenas) correspondente a 18% da viagem e por fim a Zona D (motor elétrico e térmico) correspondente a 4% da viagem. A estimativa baseada no algoritmo ABCD, respeita o mesmo padrão, isto é, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 65% da viagem, seguida da Zona B (motor térmico apenas) correspondente a 15% da viagem e por fim a Zona D (motor elétrico e térmico) correspondente a 11% da viagem.

Deste modo, a comparação entre o resultado real e a estimativa demonstra uma percentagem de acerto total de 80%, demonstrando que, apesar de se tratar de um algoritmo genérico e baseado em apenas informação dinâmica tem um desempenho bastante razoável, sendo que

é nas áreas B e D que a alocação se torna mais difícil associado à sobreposição dos intervalos dinâmicos, resultando em pontos não alocados, como se verifica graficamente na Figura 43.

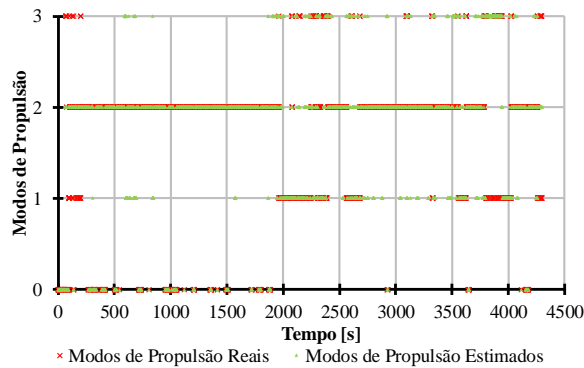


Figura 43- Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3); Pode ser observado na Tabela 7, referente à viagem 2 o mesmo padrão tanto para os resultados reais como para a estimativa, isto é, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 73% da viagem, seguida da Zona B (motor térmico apenas) correspondente a 12% da viagem e por fim a Zona D (motor elétrico e térmico) correspondente a 4% da viagem. A estimativa baseada no algoritmo ABCD, respeita o mesmo padrão, isto é, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 69% da viagem, seguida da Zona B (motor térmico apenas) correspondente a 10% da viagem e por fim a Zona D (motor elétrico e térmico) correspondente a 10% da viagem. Deste modo, a comparação entre o resultado real e a estimativa demonstra uma percentagem de acerto total de 82%, demonstrando mais um desempenho bastante razoável do método, verificando novamente nas áreas B e D uma percentagem de acerto menor, como se demonstra graficamente na Figura 44 .

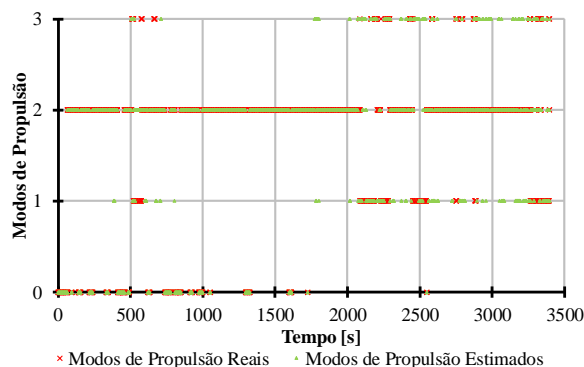


Figura 44- Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3);

No entanto, não existe comparação com o Método VSP Padrão, em virtude da necessidade deste alocar em todos os instantes um determinado consumo de combustível e uma determinada emissão de gás poluente, incoerente com o cenário real.

Por forma a validar a afirmação anterior, primeiramente realiza-se um cálculo focado nos modos de propulsão, isto é, contabiliza-se para ambos os métodos uma alocação 100% correta dos modos de propulsão, alocando-se o consumo de combustível fóssil e a emissão de gases poluentes apenas nos instantes que existe funcionamento do motor térmico. Para avaliar o desempenho dos métodos, apresenta-se o erro relativo relativamente à realidade.

Em contrapartida, efetua-se o cálculo focado no procedimento metodológico, ou seja, realiza-se o cálculo dos parâmetros tendo em conta o uso métodos como descritos inicialmente. Assim sendo, os resultados vão ser dispostos de forma separada, isto é, apresenta-se os resultados aferentes ao cálculo focado nos modos propulsão e posteriormente os resultados aferentes ao cálculo focado no procedimento metodológico, para cada parâmetro como se verifica de seguida à exceção do consumo de energia elétrica.

- **Consumo de Combustível Fóssil**

O resultado do consumo de combustível fóssil para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 8 com o erro relativo respetivo comparativamente com o consumo real em cada viagem.

Tabela 8- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);

		Massa de Combustível [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	1428,60	-
	Método ABCD	1427,18	0,10
	Método VSP Padrão	693,07	51,49
Viagem 2	Realidade	906,61	-
	Método ABCD	903,11	0,39
	Método VSP Padrão	526,08	41,97

Com base na Tabela 8 e relativo à realidade, o Método VSP Padrão apresenta um desvio médio de $46,73 \pm 4,8 \%$, reforçando a ideia da estimativa ser realizada de uma forma

constante. No entanto, a elevada exatidão do Método ABCD, com um desvio médio de $0,25 \pm 0,1 \%$, demonstra a capacidade de o método descrever o consumo do veículo ao longo da viagem de acordo com o modo de propulsão utilizado. A Figura 45 complementa a afirmação referida, demonstrando-se a incoerência da estimativa do Método VSP Padrão relativamente à realidade, como ainda se demonstra o bom desempenho do Método ABCD.

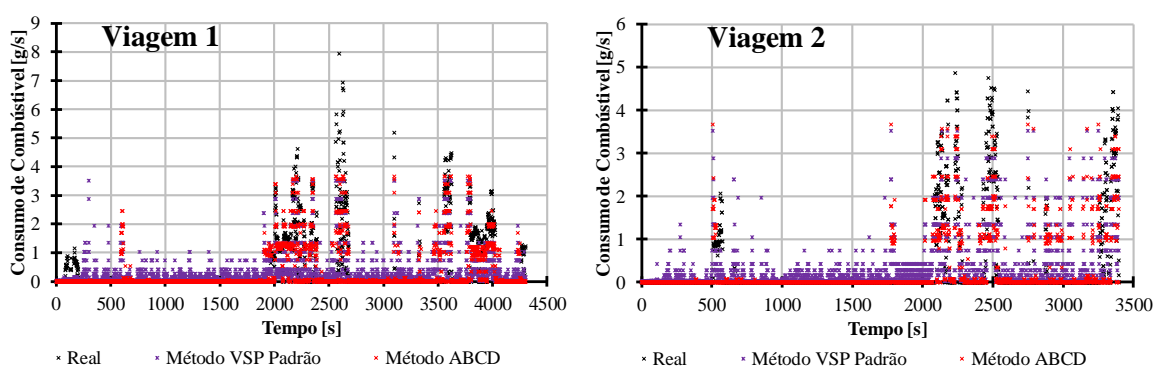


Figura 45- Comparação do consumo de combustível ao longo do tempo entre os diferentes métodos de estimativa e a realidade (Veículo A);

O resultado do consumo de combustível fóssil para ambas as viagens, tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 9, sendo este apresentado de acordo com a totalidade de massa de combustível, o volume de combustível por 100 km e o erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 9- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);

		Massa de Combustível [g]	Volume de combustível por 100 km [l/100 km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	1428,60	3,45	-
	Método ABCD	1237,30	2,99	13,39
	Método VSP Padrão	1280,36	3,10	10,38
Viagem 2	Realidade	906,61	2,86	-
	Método ABCD	790,93	2,49	12,76
	Método VSP Padrão	1054,84	3,32	16,35

Com base na Tabela 9, verifica-se que o Método ABCD quando comparado com a realidade, apresenta um desvio médio de $13,08 \pm 0,3 \%$, verificando-se que na viagem dois, obteve um resultado com maior exatidão quando comparado com o Método VSP Padrão. Por outro

lado, o Método VSP Padrão quando comparada com a realidade, apresenta um desvio médio de $13,37 \pm 3,0\%$ tendo demonstrado uma maior exatidão na estimativa do consumo de combustível na viagem 1 mas ainda assim o Método ABCD obteve um desempenho melhor.

- **Consumo de Energia Elétrica**

O resultado do consumo elétrico em ambas as viagens, durante o regime de CD, tendo em conta a realidade e as duas estimativas, apresenta-se disposto na Tabela 10, sendo relativo à totalidade de energia elétrica consumida, à energia elétrica consumida por 100 km e ao erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 10- Comparação do consumo de energia elétrica entre as diferentes abordagens (Veículo A);

		Energia elétrica	Energia elétrica por 100	Erro Relativo
		[kWh]	km [kWh/100 km]	Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	7,26	12,64	-
	Método ABCD	5,44	9,48	25,05
	Método VSP Padrão	11,73	20,42	61,49
Viagem 2	Realidade	7,21	16,36	-
	Método ABCD	4,82	10,94	33,09
	Método VSP Padrão	8,77	19,89	21,62

Com base na Tabela 10 e relativo à realidade, verifica-se que o Método ABCD , apresenta um excelente desempenho, com um desvio médio de $29,07 \pm 4,0\%$, verificando-se que na viagem um, obteve um resultado com bastante maior exatidão quando comparado com o Método VSP Padrão. Na viagem dois, apesar do Método VSP Padrão ter demonstrado uma maior exatidão na estimativa do consumo de energia elétrica, este apresentou um desvio médio de $41,56 \pm 19,9\%$, o que demonstra um desempenho inferior ao do Método ABCD. Verifica-se através da curva de SOC relativamente ao tempo apresentada na Figura 46, que o Método ABCD apresenta uma melhor linearidade relativamente à curva medida do que o Método VSP Padrão, validando novamente o desempenho superior do Método ABCD.

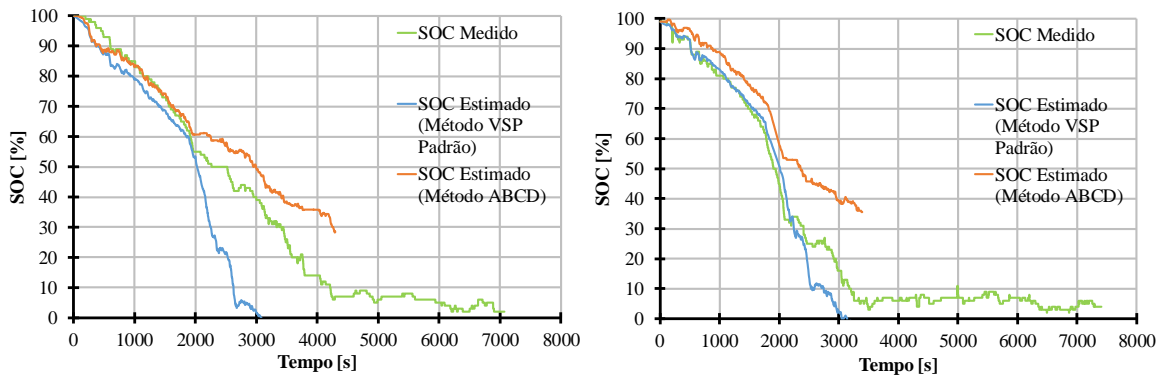


Figura 46- Aproximação do SOC em diferentes viagens baseado em diferentes abordagens (Veículo A);

A exatidão do método analisa-se através da construção de uma curva que relaciona a estimativa calculada do SOC com o valor medido. Tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 47 providencia a correlação entre o SOC estimado com base no Método ABCD e no Método VSP Padrão e o SOC medido.

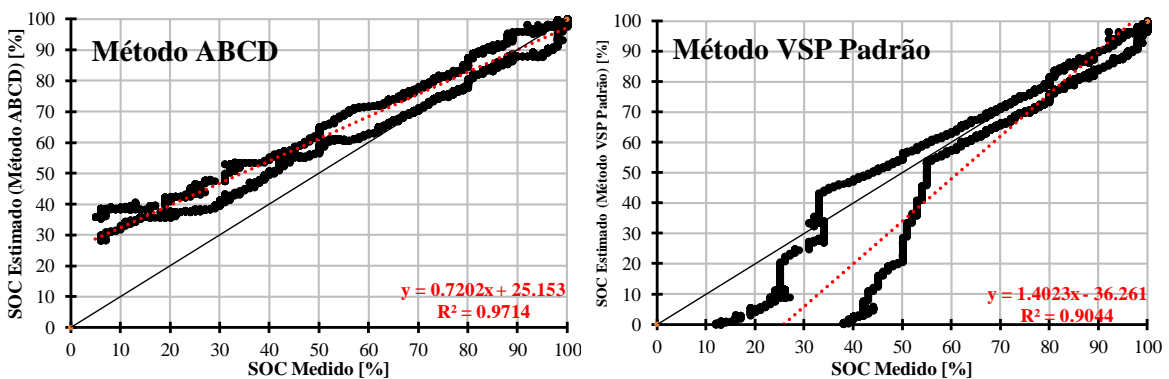


Figura 47- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método ABCD e do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD, Veículo A);

Como se verifica na Figura 47, através do Método ABCD existe uma excelente correlação ($R^2 > 0,97$) apesar do declive de reta não estar muito perto de um, como seria de esperar. Mas quando se verifica a correlação da curva obtida através do Método VSP Padrão, demonstra ter uma correlação razoável ($R^2 > 0,90$), no qual o declive da reta ainda se afasta mais de um. Estes resultados, permitem aferir novamente que o Método ABCD, apesar de ter uma menor exatidão na viagem dois, este apresenta um melhor desempenho quando se estima a curva de SOC relativamente ao tempo, sendo que, nota-se que o Método ABCD, derivado à estimativa em excesso de pontos nas Zonas B e D, o SOC varia de uma forma mais lenta quando existe um uso mais frequente do motor térmico coincidente com os instantes finais do regime de CD. O Método VSP Padrão é a situação contrária, como este não é afetado pela alteração dos modos de propulsão, a variação do SOC ocorre de forma mais rápida,

especialmente nos instantes finais do regime de CD, coincidentes com o início do percurso em autoestrada (VSP mais elevado).

- **Emissão de CO_2**

O resultado da emissão de CO_2 para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 11 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão real de CO_2 em cada viagem. Tendo em conta que a emissão de CO_2 está diretamente relacionada com o consumo de combustível, espera-se que o desempenho dos métodos seja semelhante ao anterior.

Tabela 11- Comparação da emissão de CO_2 entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);

		Massa de CO_2 [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	4441,93	-
	Método ABCD	4442,57	0,01
	Método VSP Padrão	2136,27	51,91
Viagem 2	Realidade	2840,38	-
	Método ABCD	2826,32	0,50
	Método VSP Padrão	1642,48	42,17

A emissão de CO_2 apresenta um padrão semelhante ao cenário apresentado pelo consumo de combustível. Neste sentido, como seria espectável, o Método VSP Padrão demonstra uma baixa exatidão em ambas as viagens, com um desvio médio de $47,04 \pm 4,9$ %, enquanto, o Método ABCD apresenta uma elevada exatidão, demonstrando um desvio médio de $0,26 \pm 0,2$ %. Todavia, percebe-se novamente que o Método VSP Padrão necessita de uma emissão constante para que se aproxime da realidade como se demonstra na Tabela 12

O resultado da emissão de CO_2 para ambas as viagens, atendendo ao cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 12, sendo relativo à massa de CO_2 emitida, à massa de CO_2 emitida por km e ao erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 12- Comparação da emissão de CO₂ entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);

		Massa de CO ₂ [g]	Massa de CO ₂ por km [g/ km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	4441,93	77,33	-
	Método ABCD	3851,40	67,06	13,29
	Método VSP Padrão	3981,58	69,32	10,36
Viagem 2	Realidade	2840,38	64,45	-
	Método ABCD	2467,72	55,99	13,12
	Método VSP Padrão	3300,73	74,89	16,21

Com base na Tabela 12 e relativo à realidade, verifica-se que o Método ABCD apresenta um excelente desempenho, com um desvio médio de $13,21 \pm 0,1$ %, verificando-se que na viagem um, obteve um resultado com maior exatidão quando comparado com o Método VSP Padrão. Apesar do Método VSP Padrão demonstrar uma maior exatidão na viagem dois, este apresenta um desempenho inferior, com um desvio médio de $13,29 \pm 2,9$ %.

- **Emissão de CO**

O resultado da emissão de CO para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 13 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão real de CO em cada viagem.

Tabela 13- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);

		Massa de CO [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	54,78	-
	Método ABCD	33,87	38,18
	Método VSP Padrão	38,98	28,84
Viagem 2	Realidade	21,43	-
	Método ABCD	18,20	15,07
	Método VSP Padrão	16,27	24,07

Apesar de ser esperado um desempenho melhor pelo Método VSP Padrão do que pelo Método ABCD, neste caso o Método ABCD demonstrou ter uma menor exatidão com um

desvio médio de $26,63 \pm 11,6$ %, enquanto o Método VSP Padrão apresentou um desvio médio de $26,46 \pm 2,4$ %. Nesta situação, a realização de mais ciclos de condução pode conferir uma melhor caracterização de *CO* por modo de VSP o que possibilita uma melhor aproximação à realidade.

O resultado da emissão de *CO* em ambas as viagens, tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 14, sendo relativo à massa de *CO* emitida, à massa de *CO* emitida por km e ao erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 14- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);

		Massa de CO	Massa de CO por km [g/	Erro Relativo
		[g]	km]	Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	54,78	0,95	-
	Método ABCD	43,28	0,75	21,01
	Método VSP Padrão	48,92	0,85	10,71
Viagem 2	Realidade	21,43	0,49	-
	Método ABCD	26,71	0,61	24,64
	Método VSP Padrão	27,29	0,62	27,37

Com base na Tabela 14, verifica-se que o Método ABCD quando comparado com a realidade, apresenta um desempenho razoável com um desvio médio de $22,83 \pm 1,8$ %, verificando-se que na viagem dois, obteve um resultado com melhor exatidão quando comparado com o Método VSP Padrão. Todavia, o Método VSP Padrão estimou com uma excelente exatidão a emissão de *CO* na viagem 1, apresentando neste caso um desempenho superior ao apresentar um desvio médio de $19,04 \pm 8,3$ %. É visível em ambas as perspetivas, que a média que caracteriza cada modo VSP pode não ser a mais correta, pelo qual, a realização de mais viagens poderia colmatar este fator.

- **Emissão de HC**

O resultado da emissão de *HC* para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 15 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão de *HC* real em cada viagem.

Tabela 15- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo A);

		Massa de HC [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,75	-
	Método ABCD	0,70	6,54
	Método VSP Padrão	0,11	85,67
Viagem 2	Realidade	0,31	-
	Método ABCD	0,19	40,01
	Método VSP Padrão	0,08	73,60

O mesmo padrão que se verificou nas emissões de CO é visível nas emissões de HC, isto é, existe alguma instabilidade de viagem para viagem, pelo qual, a realização de mais viagens pode ser benéfica para uma melhor aproximação à realidade. Ainda assim, relativamente à realidade o Método ABCD demonstrou um melhor desempenho, com um desvio médio de $23,27 \pm 16,7\%$, comparativamente com o Método VSP Padrão, que apresentou um desvio médio de $79,64 \pm 6,0\%$.

O resultado da emissão de HC em ambas as viagens, tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 16, sendo relativo à massa de HC emitida, a massa de HC emitida por km e o erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 16- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);

		Massa de HC [g]	Massa de HC por km [g/ km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,75	0,013	-
	Método ABCD	0,05	0,001	93,34
	Método VSP Padrão	0,59	0,010	22,26
Viagem 2	Realidade	0,31	0,007	-
	Método ABCD	0,03	0,000	89,23
	Método VSP Padrão	0,48	0,011	54,03

Com base na Tabela 16, verifica-se que o Método ABCD quando comparado com a realidade, apresenta baixa exatidão apresentando um desvio médio de $91,29 \pm 1,8 \%$, verificando-se que em ambas as viagens a estimativa da emissão de *HC* é quase nula. Em contrapartida, o Método VSP Padrão apresenta um desempenho razoável, com um desvio médio de $38,15 \pm 15,9 \%$. Esta estimativa longe da realidade reforça o facto da média de emissão de *HC* por modo de VSP não ser a que melhor caracteriza o funcionamento do veículo. Contudo as emissões de *HC*, são quase erradicadas a 100% durante passagem no catalisador, não sendo uma preocupação dado ao tratamento eficiente que é realizado. Todavia, a emissão de *HC* está geralmente associada ao funcionamento do motor térmico a “frio” e ambos os ensaios se iniciaram em uma situação pós carregamento, indicativo de uma paragem prolongada, pelo qual deve-se ter em atenção este parâmetro.

- **Emissão de NO_x**

O resultado da emissão de NO_x para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 17 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão de NO_x real em cada viagem.

Tabela 17- Comparação da emissão de NO_x entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);

		Massa de NO_x [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,86	-
	Método ABCD	1,10	28,46
	Método VSP Padrão	0,582	32,11
Viagem 2	Realidade	1,14	-
	Método ABCD	0,78	31,86
	Método VSP Padrão	0,48	57,75

O mesmo padrão que se verificou nas emissões de *CO* e *HC* é visível nas emissões de NO_x . Relativamente à realidade, o Método ABCD demonstrou um melhor desempenho, com um desvio médio de $30,16 \pm 1,7 \%$ comparativamente com o Método VSP Padrão que apenas apresentou um desvio médio de $44,93 \pm 12,8 \%$. Mais uma vez, a realização de mais ciclos de condução pode conferir uma melhor caracterização da emissão de NO_x por modo de VSP,

o que logo possibilita uma melhor aproximação à realidade e eliminar a situação de instabilidade dos resultados.

O resultado da emissão de NO_x em ambas as viagens, tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 18, sendo relativo à massa de NO_x emitida, à massa de NO_x emitida por km e ao erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 18- Comparação da emissão de NO_x entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo A);

		Massa de NO_x [g]	Massa de NO_x por km [g/ km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,86	0,015	-
	Método ABCD	0,93	0,016	8,35
	Método VSP Padrão	1,07	0,019	24,78
Viagem 2	Realidade	1,14	0,026	-
	Método ABCD	0,66	0,015	42,57
	Método VSP Padrão	0,93	0,021	18,58

Com base na Tabela 18, verifica-se que o Método ABCD quando comparado com a realidade, apresenta um desempenho razoável com um desvio médio de $25,46 \pm 17,1$ %. Neste caso, o Método VSP Padrão demonstrou comparativamente com a realidade uma estimava mais exata, com um desvio médio de $21,68 \pm 3,1$ %. Ainda assim, é visível algumas instabilidades na estimativa do Método ABCD, o que indica que a média que caracteriza cada modo VSP pode não ser a mais correta, pelo qual, a realização de mais viagens poderia colmatar este fator, à semelhança do que já se verificou anteriormente.

- **Utility Factor**

Por fim, analisa-se o desempenho do Método ABCD relativamente ao UF quando comparado com os resultados reais e os resultados provenientes do método usado atualmente. Para efetuar o cálculo do UF de acordo com o processo metodológico, é necessário um ciclo de condução composto pelos regimes de CD e CS. Existe então a necessidade de se estimar com recurso às retas tendência específicas para cada método

obtidas anteriormente, uma curva que caracteriza um ciclo de condução capaz de satisfazer as condições estipuladas. Tendo em consideração as premissas consideradas anteriormente, demonstra-se na Figura 48, as curvas que caracterizam o ciclo de condução de cada viagem de acordo com cada abordagem.

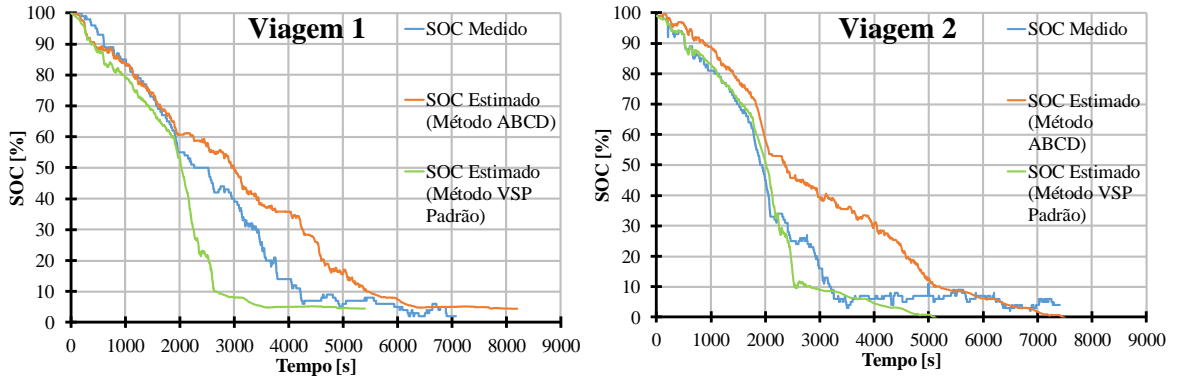


Figura 48- Curvas de Variação de SOC que caracterizam cada método utilizado (Veículo A);

Tendo a curva do ciclo de condução formada para cada abordagem, aplica-se os critérios de validação, efetua-se o cálculo do UF e calcula-se o erro relativo entre os métodos utilizados e a realidade. Os resultados obtidos e aferentes a cada viagem realizada estão dispostos na Tabela 19.

Tabela 19-Comparação do Utility Factor de acordo com o método utilizado e os critérios de validação associações (Veículo A);

		1º Critério de Validação [%] $ \Delta SOC < 2\% SOC_{total}$	2º Critério de Validação [%] $ NEC < 1\% E_{Fuel}$	Utility Factor	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	5,10 < 2%	1,37 < 1%	0,62	-
	Método ABCD	5,85 < 2%	1,11 < 1%	0,65	4,70
	Método VSP Padrão	5,85 < 2%	1,36 < 1%	0,46	25,54
Viagem 2	Realidade	2,10 < 2%	0,76 < 1%	0,36	-
	Método ABCD	12,68 < 2%	1,69 < 1%	0,42	17,27
	Método VSP Padrão	12,69 < 2%	1,73 < 1%	0,29	17,22

Apesar de não existir validação por nenhum dos critérios, justificado pela adaptação dos dados provenientes de experiências realizadas em trabalhos anteriores, verifica-se que o cálculo do UF tendo por base o Método ABCD demonstra um resultado bastante exato na primeira viagem e um resultado razoável na segunda comparativamente com a realidade,

apresentando um desvio médio de $10,99 \pm 6,3 \%$. Todavia, este método estima geralmente um regime de CD superior à realidade justificado pela capacidade de se modelar à realidade e reconhecer os períodos neutros aferentes ao uso de motor térmico, resultando no consumo nulo de energia elétrica. O Método VSP Padrão, estima geralmente um regime de CD inferior à realidade devido à sua incapacidade de detetar períodos no qual não existe consumo de energia elétrica, o que provocou um baixo desempenho comparativamente com o Método ABCD, apresentando um desvio médio de $21,38 \pm 4,2 \%$.

3.2.2 – Veículo B

Repetindo agora todo o procedimento metodológico, mas agora específico ao veículo B, visualiza-se através da Figura 49 a definição das zonas com base na curva que relaciona o consumo de combustível médio e os modos de VSP, à semelhança da representação gráfica realizada aferentes às zonas de consumo elétrico (Figura 33). A diferenciação entre a zona A e C, limita-se à grandeza da velocidade, se nula, considera-se Zona A, caso contrário, considera-se Zona C.

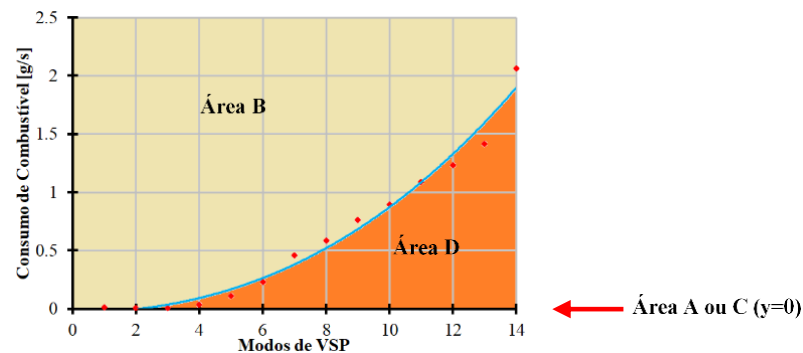


Figura 49-Relação entre o consumo de combustível e os modos de VSP que modelam as zonas aferentes a cada situação (Zona A, Zona B, Zona C e Zona D);

Tendo todos os pontos caracterizados, recorrendo às condições limitantes reais e recorrendo ao algoritmo ABCD, com base na Tabela 20 e na Tabela 21, verifica-se a contagem dos pontos reais em cada zona de propulsão, a contagem dos pontos obtidos através do algoritmo em cada zona de propulsão, a contagem dos pontos obtidos através do algoritmo que se encontram bem alocados e por fim a percentagem de acerto, sendo específico para cada viagem, respetivamente.

Tabela 20- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 1, Veículo B);

Tipo de Propulsão	Viagem 1				Pontos alocados corretamente	Percentagem de Acerto [%]
	Alocação dos Pontos (Real)		Alocação dos Pontos (Algoritmo ABCD)			
Zona A	302	(9%)	302	(9%)	302	100,00
Zona B	17	(1%)	263	(8%)	10	58,82
Zona C	3003	(88%)	2554	(75%)	2519	83,88
Zona D	75	(2%)	278	(8%)	42	56,00
Não Alocados	-	-	-	-	524	15,43
Total	3397	(100%)	3397	(100%)	2873	84,57

Tabela 21- Comparação entre os pontos reais e os pontos estimados em cada zona de propulsão (Viagem 2, Veículo B);

Tipo de Propulsão	Viagem 2				Pontos alocados corretamente	Percentagem de Acerto [%]
	Alocação dos Pontos (Real)		Alocação dos Pontos (Algoritmo ABCD)			
Zona A	281	(9%)	281	(9%)	281	100,00
Zona B	47	(1%)	311	(9%)	30	63,83
Zona C	2885	(87%)	2381	(72%)	2350	81,46
Zona D	87	(3%)	327	(10%)	55	63,22
Não Alocados	-	-	-	-	584	17,70
Total	3300	(100%)	3300	(100%)	2716	82,30

Através da Tabela 20, referente à viagem um e de acordo com as condicionantes reais, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 88% da viagem, seguida da Zona D (motor elétrico e térmico) correspondente a 2% da viagem e por fim a Zona D (motor térmico apenas) correspondente a 1% da viagem.

A estimativa baseada no algoritmo ABCD, respeita o mesmo padrão, isto é, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 75% da viagem, seguida da Zona B (motor térmico apenas) e da Zona D (motor elétrico e térmico) com uma percentagem semelhante correspondente a 8% da viagem. Deste modo, a comparação entre o resultado real e a estimativa demonstra uma percentagem de acerto total de 85%, demonstrando que, apesar de se tratar de um algoritmo genérico e baseado em apenas informação dinâmica tem um desempenho bastante razoável, sendo que é nas áreas B e D

que a alocação se torna mais difícil derivado a haver sobreposição dos intervalos dinâmicos, resultando em pontos não alocados, como se verifica graficamente na Figura 50.

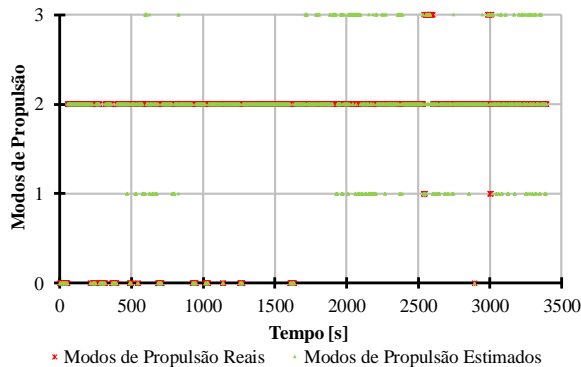


Figura 50- Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3); Transversalmente na Tabela 21, aferente à viagem dois, o mesmo padrão real repete-se, isto é, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 87% da viagem, seguida da Zona D (motor elétrico e térmico) correspondente a 3% da viagem e por fim a Zona B (motor térmico apenas) correspondente a 1% da viagem.

A estimativa baseada no algoritmo ABCD, mantém o padrão anterior também, isto é, existe predominância da Zona C (apenas motor elétrico) correspondente a 72% da viagem, seguida da Zona D (motor elétrico e térmico) correspondente a 10% da viagem e por fim a Zona B (motor térmico apenas) correspondente a 9% da viagem. Deste modo, a comparação entre o resultado real e a estimativa demonstra um percentagem de acerto total de 82%, demonstrando mais um desempenho bastante razoável do método, apesar que é novamente nas áreas B e D que a alocação se torna mais difícil, como se demonstra graficamente na Figura 51.

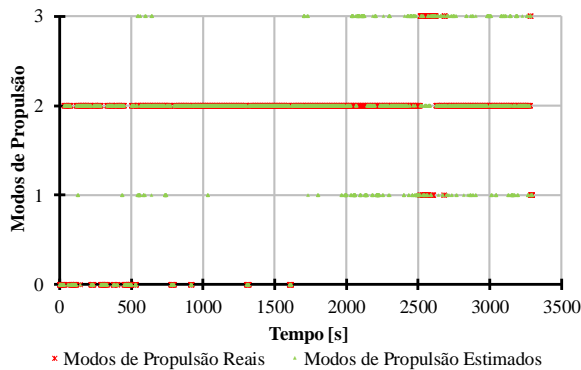


Figura 51- Sobreposição dos modos de propulsão estimados nos modos de propulsão reais (Zonas:A=0,B=1,C=2,D=3);

Por outro lado, à semelhança da análise realizada anteriormente para o Veículo A, não existe comparação entre alocação obtida pelo Método ABCD e uma possível alocação obtida pelo Método VSP Padrão. Desta forma, valida-se o desempenho do Método ABCD relativamente ao consumo e emissões de gases poluentes quando comparado com os resultados reais e os resultados provenientes do método usado atualmente mas também comprova-se a afirmação relativa à falsa alocação do Método VSP Padrão, seguindo o raciocínio semelhante aplicado ao Veículo A. Posto isto, os resultados vão ser dispostos de forma separada, ou seja, dispõem-se os resultados aferentes ao cálculo focado nos modos propulsão e os resultados aferentes ao cálculo focado no procedimento metodológico, para cada parâmetro como se verifica de seguida à exceção do consumo de energia elétrica.

- **Consumo de Combustível Fóssil**

O resultado do consumo de combustível fóssil para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 22 com o erro relativo respetivo comparativamente com o consumo real em cada viagem.

Tabela 22- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);

		Massa de Combustível [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	54,10	-
	Método ABCD	53,93	0,32
	Método VSP Padrão	6,85	87,34
Viagem 2	Realidade	80,00	-
	Método ABCD	77,93	2,59
	Método VSP Padrão	7,51	90,61

À semelhança dos resultados obtidos para o veículo A, os resultados aferentes ao Método VSP Padrão, são de baixa precisão com um desvio médio de $89,01 \pm 1,6 \%$, reafirmando que este método estima qualquer parâmetro de uma forma cega. Por outro lado, o Método ABCD revela um elevado desempenho, com um desvio médio de $1,46 \pm 1,1 \%$.

A Figura 52 permite visualizar as afirmações ditas anteriormente, expondo a fraca capacidade do Método VSP Padrão replicar a realidade ao contrário do Método ABCD que consegue traçar com precisão o padrão desta.

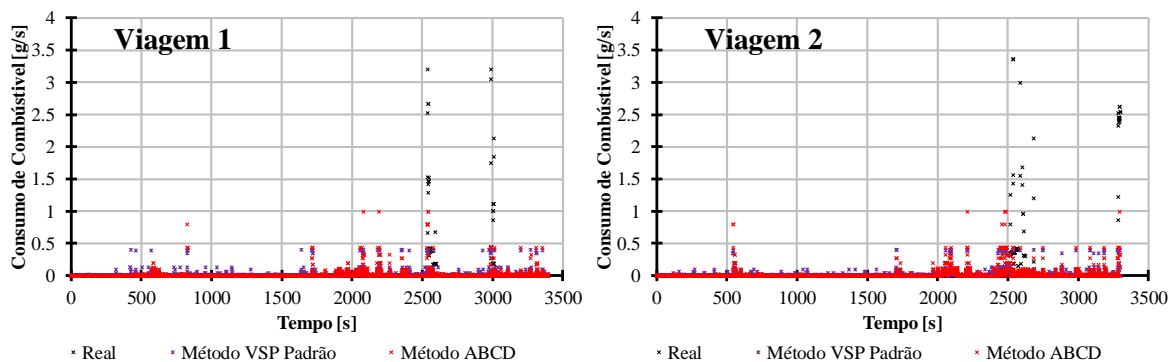


Figura 52- Comparação do consumo de combustível ao longo do tempo entre os diferentes métodos de estimativa e a realidade (Veículo B);

O resultado do consumo de combustível fóssil para ambas as viagens, tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 23, sendo este apresentado de acordo com a totalidade de massa de combustível, o volume de combustível por 100 km e o erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 23- Comparação do consumo de combustível entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);

		Massa de Combustível [g]	Volume de combustível por 100 km [l/100 km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	54,10	0,174	-
	Método ABCD	47,97	0,154	11,33
	Método VSP Padrão	62,76	0,202	16,00
Viagem 2	Realidade	80,00	0,249	-
	Método ABCD	64,85	0,202	18,94
	Método VSP Padrão	71,21	0,222	11,00

Com base na Tabela 23, verifica-se que o Método ABCD quando comparado com a realidade, apresenta um excelente desempenho, com um desvio médio de $15,14 \pm 3,8$ %, verificando-se que na viagem um, obteve um resultado com maior exatidão quando comparado com o Método VSP Padrão. Ainda assim, o Método VSP Padrão demonstrou um desempenho superior, com um desvio médio de $13,50 \pm 2,5$ %, tendo maior exatidão na estimativa do consumo de combustível na segunda viagem. A ausência de instantes no qual a fonte térmica se encontra em funcionamento, coloca a estimativa efetuada em dúvida,

podendo esta ser subestimada caso se pretenda estudar um ciclo de condução mais exigente (ciclo extraurbano) ou mais longo.

- **Consumo de Energia Elétrica**

O resultado do consumo elétrico em ambas as viagens, durante o regime de CD, tendo em conta a realidade e as duas estimativas, apresenta-se disposto na Tabela 24, sendo relativo à totalidade de energia elétrica consumida, à energia elétrica consumida por 100 km e ao erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 24- Comparação do consumo de energia elétrica entre as diferentes abordagens (Veículo B);

		Energia elétrica	Energia elétrica por 100	Erro Relativo
		[kWh]	km [kWh/100 km]	Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	5,70	13,2	-
	Método ABCD	3,81	8,8	33,1
	Método VSP Padrão	3,18	7,3	44,2
Viagem 2	Realidade	6,16	13,86	-
	Método ABCD	3,10	6,94	49,76
	Método VSP Padrão	3,84	8,62	37,75

Com base na Tabela 24, verifica-se que tanto o Método ABCD como o Método VSP Padrão, apresentam um resultado razoável. Ainda assim, não sendo expectável quando se compara os métodos com a realidade, verifica-se que o Método VSP Padrão obteve um melhor desempenho, com um desvio médio de $40,85 \pm 3,4$ % relativamente ao Método ABCD que apresentou um desvio médio de $41,43 \pm 8,3$ %, sendo ligeiramente superior.

Ainda assim, o Método VSP Padrão providencia uma estimativa cega, logo quando a curva de SOC relativamente ao tempo é traçada, verifica-se que o Método ABCD apresenta em ambas as viagens uma melhor aproximação da realidade quando comparada com a curva obtida com base no Método VSP Padrão, como se pode verificar na Figura 53.

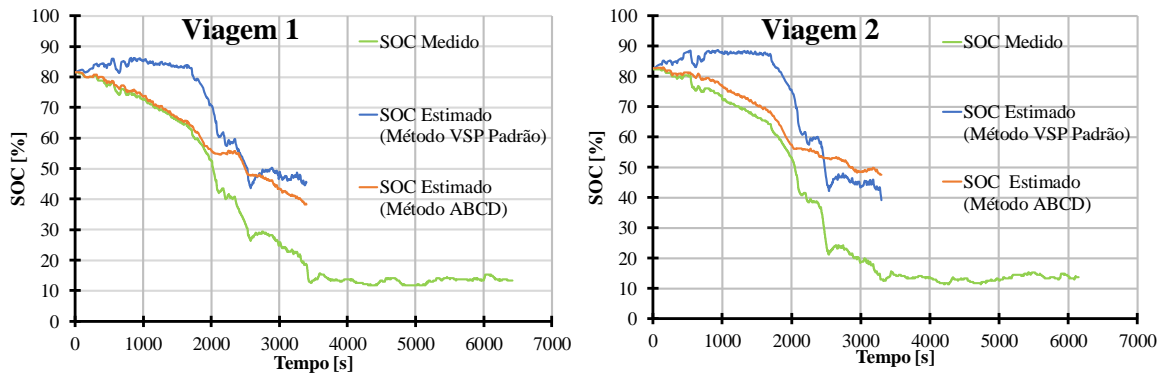


Figura 53- Aproximação do SOC em diferentes viagens baseado em diferentes abordagens (Veículo B);

A exatidão do método, analisa-se através da construção de uma curva que relaciona a estimativa calculada do SOC com o valor medido. Tendo em consideração as duas viagens realizadas, a Figura 54 providencia a correlação entre o SOC estimado com base no Método ABCD e no Método VSP Padrão e o SOC medido.

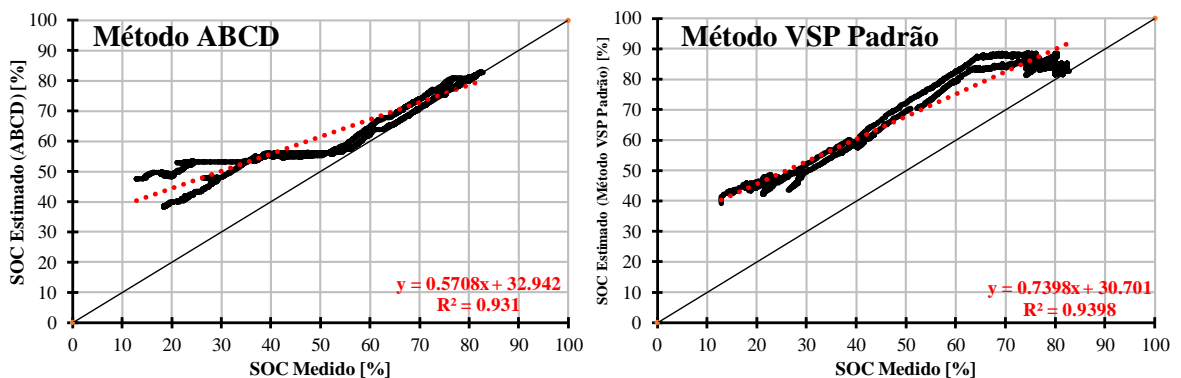


Figura 54- Comparação entre o SOC medido e o SOC estimado através do Método ABCD e do Método VSP Padrão para as duas viagens realizadas (regime de CD, Veículo B);

Como se verifica na Figura 54, ambos os métodos apresentam uma excelente correlação superior a 0,9, apesar que as retas obtidas não se aproximam de um, como seria de esperar. O desempenho mediano do Método ABCD, é consequência da existência de poucos instantes no qual o Veículo B recorreu à fonte térmica, resultando que, durante a aplicação do algoritmo genérico a previsão das zonas B e D será muito superior à realidade resultando diferença existente entre duas curvas. Ainda assim, estes resultados, permitem aferir novamente que o Método ABCD, apesar de apresentar um resultado com menor exatidão, este apresenta um melhor desempenho ao estimar a curva de SOC relativamente ao tempo.

Em contrapartida, o Método VSP Padrão como não é afetado pela alteração dos modos de propulsão, a variação do SOC ocorre de forma mais rápida, especialmente nos instantes

finais do regime de CD, coincidentes com o início do percurso em autoestrada (VSP mais elevado) e no qual inicialmente não demonstra qualquer variação (VSP mais baixo).

- **Emissão de CO_2**

O resultado da emissão de CO_2 para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 25 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão de CO_2 real em cada viagem. Tendo em conta que a emissão de CO_2 está diretamente relacionada com o consumo de combustível, espera-se que o desempenho dos métodos seja semelhante ao apresentado anteriormente na estimativa do consumo de combustível fóssil.

Tabela 25- Comparação da emissão de CO_2 entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);

		Massa de CO_2 [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	211,36	-
	Método ABCD	209,86	0,71
	Método VSP Padrão	26,61	87,41
Viagem 2	Realidade	313,76	-
	Método ABCD	306,40	2,34
	Método VSP Padrão	29,48	90,60

À semelhança do que se verificou anteriormente a estimativa da emissão de CO_2 calculada através do Método VSP Padrão demonstra uma baixa exatidão em ambas as viagens, com um desvio médio de $89,01 \pm 1,6 \%$,ao contrário da estimativa apresentada pelo Método ABCD que apresenta uma elevada exatidão apresentando um desvio médio de $1,53 \pm 0,8 \%$, coerente com o cenário verificado na estimativa do consumo de combustível.

O resultado da emissão de CO_2 em ambas as viagens, considerando um cálculo focado no procedimento metodológico, dispõem-se na Tabela 26, sendo relativo à massa de CO_2 emitida, à massa de CO_2 emitida por km e ao erro relativo das estimativas face à realidade.

Tabela 26- Comparação da emissão de CO₂ entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);

		Massa de CO ₂ [g]	Massa de CO ₂ por km [g/ km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	211,36	4,89	-
	Método ABCD	187,13	4,33	11,46
	Método VSP Padrão	245,80	5,69	16,29
Viagem 2	Realidade	313,76	7,06	-
	Método ABCD	254,00	5,72	19,05
	Método VSP Padrão	278,78	6,27	11,15

Com base na Tabela 26, verifica-se que o Método ABCD apresenta um excelente desempenho relativamente à realidade com um desvio médio de $15,26 \pm 3,8$ %, verificando-se que na viagem um, obteve um resultado com maior exatidão. Ainda assim, o Método VSP Padrão apresentou um desempenho superior com um desvio médio de $13,72 \pm 2,6$ %, como seria espectável tendo em vista a estimativa do consumo de combustível fóssil.

- **Emissão de CO**

O resultado da emissão de CO para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 27 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão de CO em cada viagem.

Tabela 27- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);

		Massa de CO [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	5,16	-
	Método ABCD	2,17	57,89
	Método VSP Padrão	0,30	94,19
Viagem 2	Realidade	1,80	-
	Método ABCD	1,34	25,70
	Método VSP Padrão	0,14	92,22

Relativamente à realidade, o Método ABCD apresenta um melhor desempenho com um desvio médio de $41,80 \pm 16,1$ % relativamente ao Método VSP Padrão que apresenta um

desvio médio de $93,21 \pm 1,0$ %. Ainda assim, ambos os métodos aplicados apresentam um desvio médio superior a 20% em todas as viagens, o que demonstra que a estimativa calculada se afasta da realidade, justificado pela escassez de pontos nas zonas de propulsão B e D, o que incrementa a possibilidade da média por modo de VSP não ser a mais correta.

O resultado da emissão de *CO* em ambas as viagens, tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 28, sendo relativo à massa de *CO* emitida, à massa de *CO* emitida por km e ao erro relativo das estimativas em relação à realidade.

Tabela 28- Comparação da emissão de CO entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);

		Massa de <i>CO</i> [g]	Massa de <i>CO</i> por km [g/ km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	5,16	0,12	-
	Método ABCD	1,67	0,04	67,73
	Método VSP Padrão	1,63	0,04	68,35
Viagem 2	Realidade	1,80	0,040	-
	Método ABCD	1,67	0,038	6,96
	Método VSP Padrão	1,89	0,043	5,10

Com base na Tabela 28, e relativamente à realidade verifica-se que o Método ABCD, apresenta um desempenho inferior com um desvio médio de $37,35 \pm 30,4$ %, comparativamente o com o Método VSP Padrão que apresentou um desvio médio de $36,73 \pm 31,6$ %. O fraco resultado apresentado na primeira viagem pelos dois métodos, é consequência mais uma vez da escassez de pontos, 1% no modo “B” e 2% no modo “D”, o que pode ser solucionado com a realização de mais ciclos de condução, otimizando a média de *CO* por modo VSP.

- **Emissão de HC**

O resultado da emissão de *HC* para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 29 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão de *HC* real em cada viagem.

Tabela 29- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão (Veículo B);

		Massa de HC [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,12	-
	Método ABCD	0,16	30,91
	Método VSP Padrão	0,02	83,33
Viagem 2	Realidade	0,18	-
	Método ABCD	0,14	23,14
	Método VSP Padrão	0,02	88,89

O Método ABCD demonstra mais uma vez um melhor desempenho, com um desvio médio de $27,03 \pm 3,9$ % relativamente ao Método VSP Padrão que apresenta com um desvio médio de $86,11 \pm 2,8$ %. Ao contrário do veículo A, os resultados obtidos neste caso, demonstram que a média por modo de VSP da emissão de HC aproxima a realidade.

O resultado da emissão de HC em ambas as viagens, considerando o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 30, sendo relativo à massa de HC emitida, a massa de HC emitida por km e ao erro relativo das estimativas face à realidade.

Tabela 30- Comparação da emissão de HC entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);

		Massa de HC [g]	Massa de HC por km [g/ km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,12	0,003	-
	Método ABCD	0,13	0,003	4,73
	Método VSP Padrão	0,14	0,003	9,78
Viagem 2	Realidade	0,18	0,0039	-
	Método ABCD	0,15	0,0033	17,28
	Método VSP Padrão	0,16	0,0037	6,96

Com base na Tabela 30, verifica-se que o Método ABCD apresenta um ótimo desempenho com um desvio médio de $11,01 \pm 6,3$ %, apesar do Método VSP Padrão demonstrar um desempenho superior com um desvio médio de $8,37 \pm 1,4$ %.

- **Emissão de NO_x**

O resultado da emissão de NO_x para ambas as viagens tendo em conta um cálculo focado nos modos propulsão utilizados em cada instante está disposto na Tabela 31 com o erro relativo respetivo comparativamente com a emissão de NO_x real em cada viagem.

Tabela 31- Comparação da emissão de NO_x entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);

		Massa de NO_x [g]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,12	-
	Método ABCD	0,27	131,03
	Método VSP Padrão	0,03	75,00
Viagem 2	Realidade	0,45	-
	Método ABCD	0,29	35,05
	Método VSP Padrão	0,03	93,33

O Método ABCD demonstra um desempenho razoável com um desvio médio de $83,04 \pm 48,0$ %, apesar de existir alguma instabilidade de viagem para viagem. Neste caso o Método VSP Padrão apresentou um desempenho inferior, com um desvio médio de $84,17 \pm 9,2$ %.

O resultado da emissão de NO_x em ambas as viagens, considerando o cálculo focado no procedimento metodológico, apresenta-se disposto na Tabela 32, sendo relativo à massa de NO_x emitida, a massa de NO_x emitida por km e o erro relativo das previsões face à realidade.

Tabela 32- Comparação da emissão de NO_x entre as diferentes abordagens tendo em conta o cálculo focado no procedimento metodológico (Veículo B);

		Massa de NO_x [g]	Massa de NO_x por km [g/ km]	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	0,12	0,002	-
	Método ABCD	0,22	0,005	86,29
	Método VSP Padrão	0,26	0,006	123,39
Viagem 2	Realidade	0,45	0,010	-
	Método ABCD	0,31	0,007	30,59
	Método VSP Padrão	0,30	0,007	32,56

Com base na Tabela 32, verifica-se que o Método ABCD apresenta um desempenho superior, com um desvio médio de $58,44 \pm 27,9$ % relativamente ao Método VSP Padrão que apresentou um desvio médio de $77,98 \pm 45,4$ % apesar de ser visível a necessidade de aprimorar a emissão de NO_x por modo de VSP pode não ser a mais correta.

- **Utility Factor**

Por fim, analisa-se o desempenho do Método ABCD relativamente ao UF quando comparado com os resultados reais e os resultados provenientes do método usado atualmente, para tal repete-se o processo metodológico, à semelhança do que foi realizado para o veículo A. Tendo em consideração as premissas consideradas, demonstra-se na Figura 55, as curvas que caracterizam o ciclo de condução de acordo com cada abordagem.

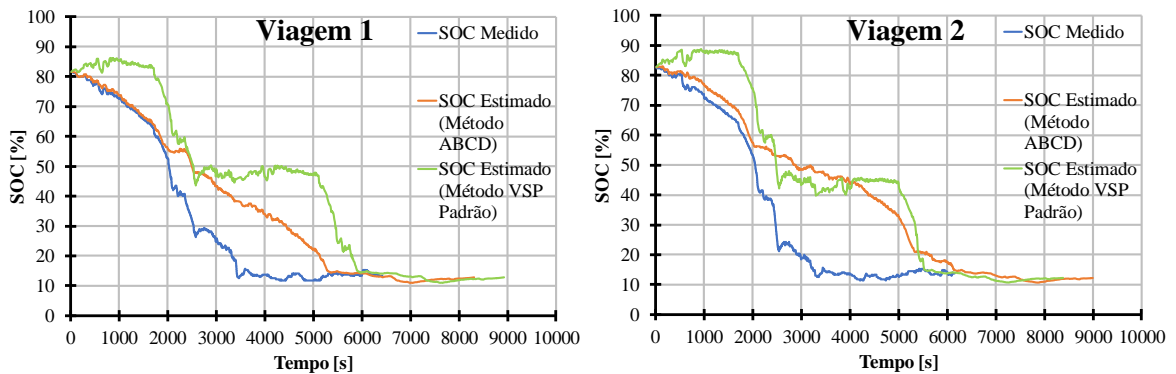


Figura 55- Curvas de Variação de SOC que caracterizam cada método utilizado (Veículo B).

Tendo a curva do ciclo de condução formada para cada abordagem, prossegue-se com o procedimento metodológico, isto é, aplica-se os critérios de validação, efetua-se o cálculo do UF e calcula-se o erro relativo entre os métodos utilizados e a realidade. Os resultados obtidos e aferentes a cada viagem realizada estão dispostos na Tabela 33.

Tabela 33- Comparação do Utility Factor de acordo com o método utilizado e os critérios de validação associações (Veículo B);

		1º Critério de Validação [%] $ \Delta SOC < 2\% SOC_{total}$	2º Critério de Validação [%] $ NEC < 1\% E_{Fuel}$	Utility Factor	Erro Relativo Absoluto [%]
Viagem 1	Realidade	7,47 < 2%	10,04 < 1%	0,48	-
	Método ABCD	3,22 < 2%	1,23 < 1%	0,54	19,1
	Método VSP Padrão	3,22 < 2%	1,19 < 1%	0,59	28,4

Viagem 2	Realidade	1,14 < 2%	7,17 < 1%	0,46	-
	Método ABCD	3,98 < 2%	1,42 < 1%	0,61	32,1
	Método VSP Padrão	3,98 < 2%	1,44 < 1%	0,58	24,9

À semelhança do Veículo A, não existiu validação de nenhum critério, justificado pela adaptação dos dados provenientes de experiências realizadas em trabalhos anteriores. Verifica-se que o cálculo do UF, tendo por base o Método ABCD apresenta um desempenho ligeiramente superior comparativamente com o Método VSP Padrão com um desvio médio de $25,60 \pm 6,5$ %.

Por outro lado, seria esperado que o Método VSP Padrão, demonstrasse resultados de baixa exatidão quando comparado com a realidade. Neste caso devido ao pouco uso da fonte térmica, assemelhando-se a um carro elétrico, beneficia a aplicação do Método VSP Padrão, promovendo um melhor desempenho deste, demonstrando assim um resultado constante e com um desvio médio de $26,65 \pm 1,8$ %.

3.3 – Aplicação dos Métodos em Perfis de Velocidade Aleatórios

Tendo concluído o desenvolvimento do Método ABCD e demonstrado que este método é capaz de replicar a realidade com bastante exatidão, por vezes superior à exatidão demonstrada pelo Método VSP Padrão, acrescentando ainda informação acerca dos modos de propulsão tendo apenas por base a informação dinâmica disponível do ciclo de condução algo que o Método VSP Padrão é incapaz de fornecer.

De modo a colocar o Método ABCD em prática de uma forma aleatória, aplicou-se este a cinquenta ciclos de condução realizados de diferentes tipologias (Urbano, Misto, Extraurbano), identificadas pelo limites de velocidade característicos destas tipologias e no qual se comparou os resultados com o Método VSP Padrão, não havendo comparação real possível, derivado se tratarem de dados dinâmicos apenas. Neste sentido, os parâmetros de comparação são o consumo energético (Combustível e Eletricidade), as emissões de gases poluentes (CO_2 ; CO ; HC ; NO_x) e o UF, conferindo assim, a veracidade dos métodos aplicados quando expostos a um ciclo de condução aleatório. Os resultados, estes estão expostos tendo em conta o veículo em estudo e de um modo gráfico, de acordo com o tipo de método utilizado.

3.3.1 – Veículo A

À semelhança do subcapítulo anterior analisa-se primeiramente o consumo energético, combustível e eletricidade. Estipula-se para a realização do teste a necessidade de um veículo com carga inicial máxima e um ciclo de condução completo caracterizado por um regime de CD e um regime de CS equivalente apenas a um ciclo de condução base.

Neste sentido demonstra-se na Figura 56 e na Figura 57, em forma de Boxplot, o consumo médio de combustível e o consumo médio de eletricidade de acordo com o método aplicado e aferente à tipologia de cada ciclo de condução, respetivamente.

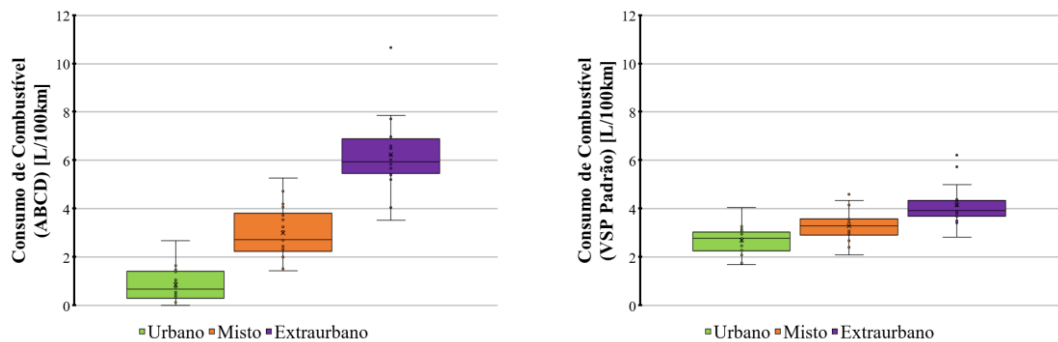


Figura 56- Consumo médio de Combustível obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);

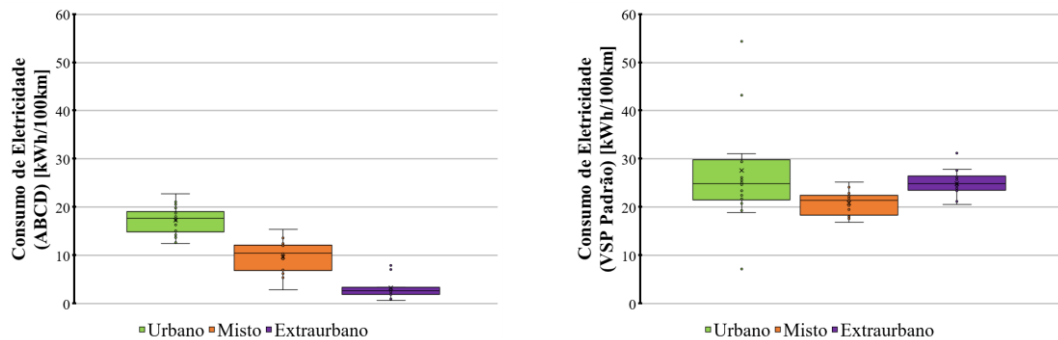


Figura 57- Consumo médio de eletricidade obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);

Como se demonstra na Figura 56 e na Figura 57, prevê-se de acordo com o funcionamento do veículo híbrido Plug-in, um consumo médio de combustível crescente, ou seja, de acordo com a tipologia do ciclo de condução, o consumo médio de combustível deve ser mais baixo num ciclo de condução urbano, intermédio num ciclo de condução misto e mais elevado num ciclo de condução extraurbano, sendo este cenário inverso quando comparado com um veículo dotado de apenas uma fonte de propulsão térmica. Por outro lado, prevê-se um consumo médio de eletricidade decrescente, ou seja, de acordo com a tipologia do ciclo de

condução, o consumo médio de eletricidade deve ser mais elevado num ciclo de condução urbano, intermédio num ciclo de condução misto e mais baixo num ciclo de condução extraurbano.

O Método ABCD, sendo um método capacitado de reconhecer os modos de propulsão em cada instante, consegue adaptar-se melhor às diferentes tipologias dos ciclos de condução, o que permite obter um consumo médio de combustível e eletricidade coerente o que seria espectável. Em contrapartida, o Método VSP Padrão é incapaz de demonstrar a relação entre o consumo de combustível e o consumo de eletricidade, justificado pelo facto de este método analisar o veículo como se este fosse dotado apenas de uma fonte térmica ou elétrica.

Relativamente às emissões de gases poluentes, mantendo as condições enunciadas demonstra-se na Figura 58, na Figura 59, na Figura 60 e na Figura 61, novamente em forma de Boxplot, a emissão cada de gás poluente de acordo com o método aplicado e aferente à tipologia de cada ciclo de condução, respetivamente.

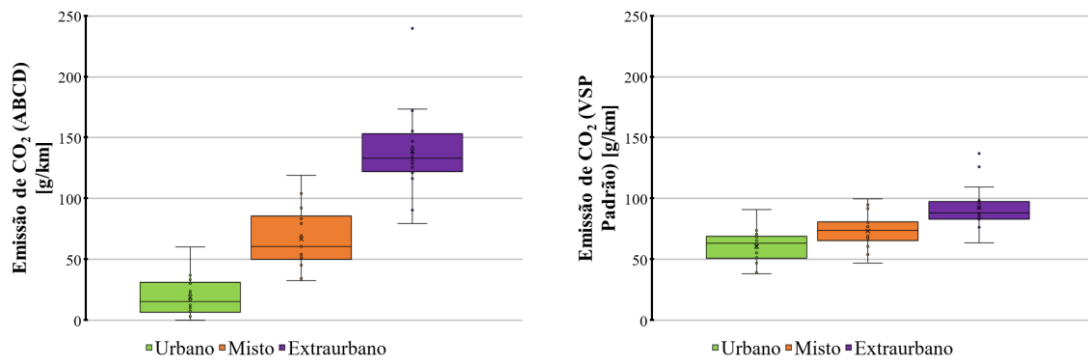


Figura 58- Emissão de CO₂ obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);

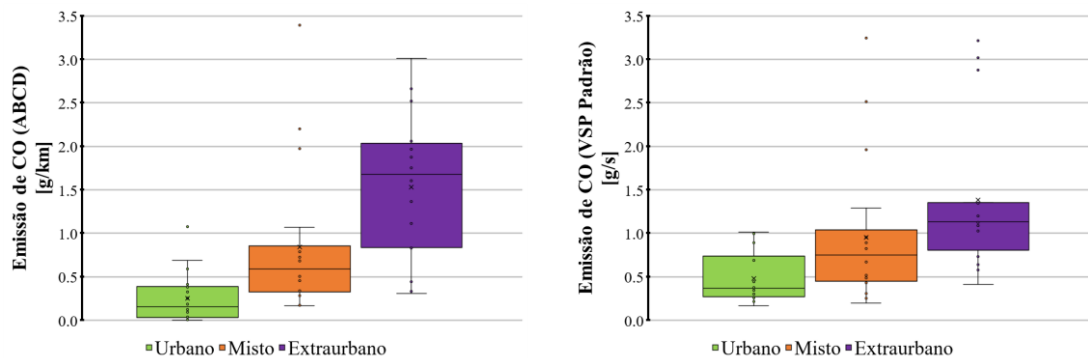


Figura 59- Emissão de CO obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão, (Veículo A);

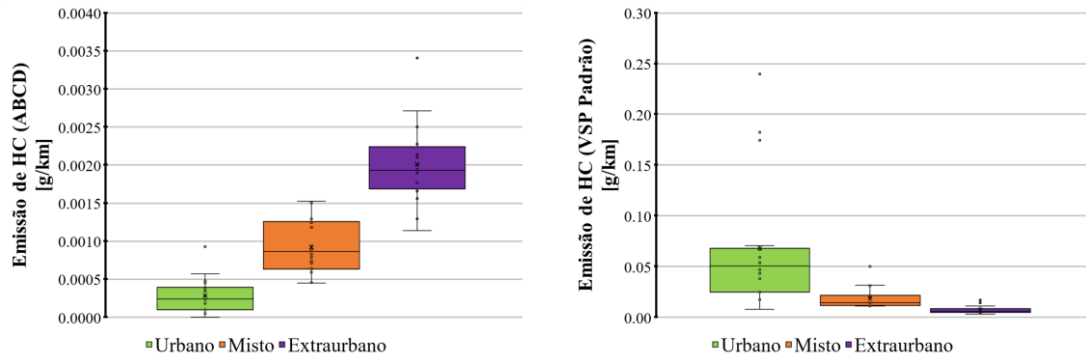


Figura 60- Emissão de HC obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);

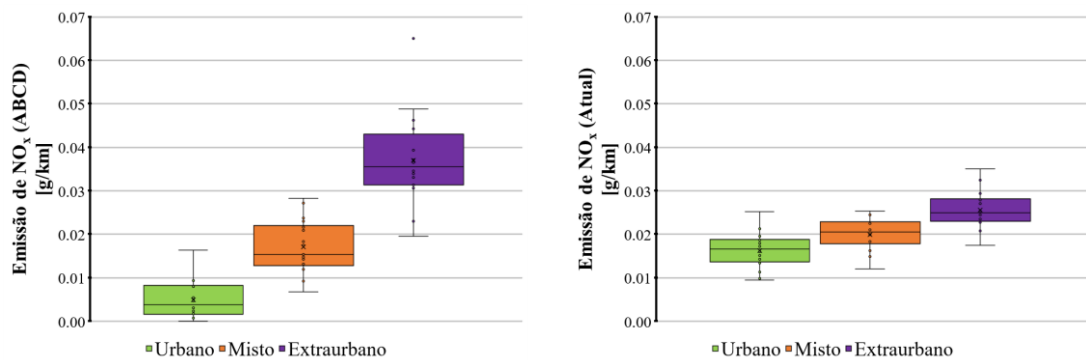


Figura 61- Emissão de NO_x obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);

Através da Figura 58, da Figura 59, da Figura 60 e da Figura 61 prevê-se que a emissão de gases poluentes no geral deve ser mais baixa num ciclo de condução urbano, intermédio num ciclo de condução misto e mais elevado num ciclo de condução extraurbano. Por outro lado, verifica-se que as emissões de gases poluentes estimadas através do Método ABCD são superiores às apresentadas pelo Método VSP Padrão, sendo coerente com a estimativa de combustível no qual o Método ABCD previu um consumo maior relativamente à estimativa obtida através do Método VSP Padrão.

Por fim, analisando o UF, mantendo as condições enunciadas, prevê-se um valor constante, por forma a caracterizar o veículo em estudo, mais nomeadamente conhecido como UF individual. Neste sentido demonstra-se na Figura 62, novamente em forma de Boxplot, o UF de acordo com o método aplicado e aferente à tipologia de cada ciclo de condução, respetivamente.

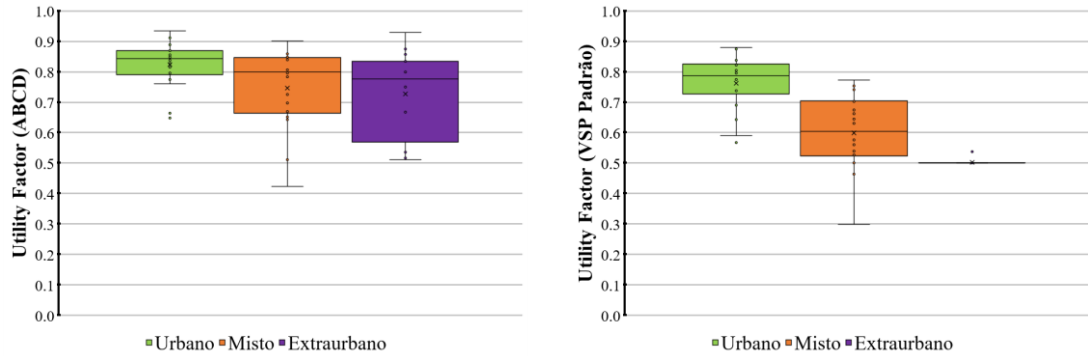


Figura 62- Utility Factor obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo A);

Através da Figura 62, verifica-se que o Método ABCD apresenta um média do UF constante nas três tipologias de ciclo de condução, coerente com a definição de UF individual, demonstrando apenas pequenas variações apesar dos diferentes tipos de ciclos de condução realizados. Em contrapartida, o Método VSP Padrão, demonstra uma variação significativa da média entre as tipologias dos ciclos de condução, incoerente com a definição de UF individual

Todavia, é possível ainda comparar o resultado obtido com o resultado expectável demonstrado pela curva normalizada para a realização dos ciclos WLTP [31]. Neste sentido demonstra-se na Figura 63, a comparação entre a curva WLTP com a curva criada através dos resultados obtidos com o Método ABCD e o Método VSP Padrão.

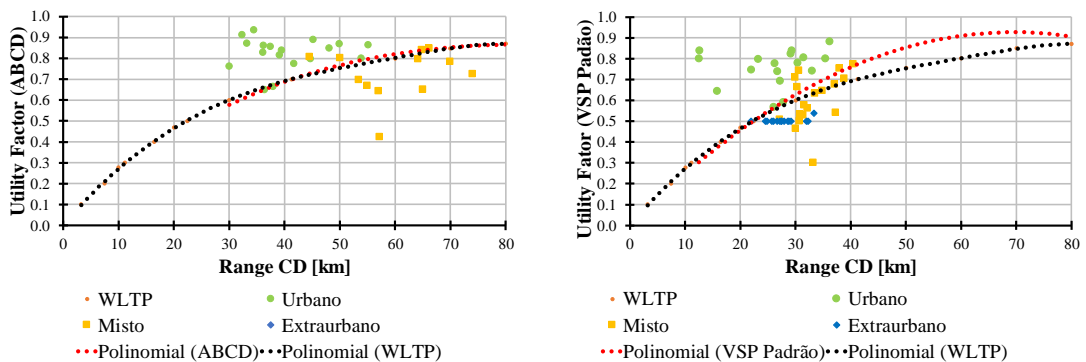


Figura 63- Comparação da curva WLTP com a curva criada através dos resultados obtidos com o Método ABCD e o Método VSP Padrão; (Veículo A)

Com base na Figura 63, é possível afirmar à primeira vista que a curva obtida através do Método ABCD se sobrepõe à curva normalizada, o que indica uma melhor exatidão quando se verifica a sobreposição da curva obtida com o Método VSP Padrão com a curva normalizada. No entanto, o resultado obtido pelo o Método VSP Padrão não reflete a realidade, isto porque, tendo o veículo em estudo uma capacidade de 40 km elétricos, os

resultados deveriam ser superiores aos obtidos, apesar que o Método ABCD embora mais coerente com a realidade, obteve resultados que demonstram uma distancia elétrica muito superior ao normal na análise dos dados aferentes aos ciclos de condução extraurbanos, sendo este facto, justificados por velocidades médias mais elevadas (superior a 30 m/s), o que promove o uso da fonte térmica exclusivamente, levando a uma variação lenta do SOC durante o regime de CD.

3.3.2 – Veículo B

Repetindo de novo todo o processo executado para o veículo A, inicialmente analisa-se o consumo energético (combustível e eletricidade) mantendo as condições definidas anteriormente. Demonstra-se na Figura 64 e na Figura 65, em forma de Boxplot, o consumo médio de combustível e o consumo médio de eletricidade de acordo com o método aplicado e aferente à tipologia de cada ciclo de condução, respetivamente.

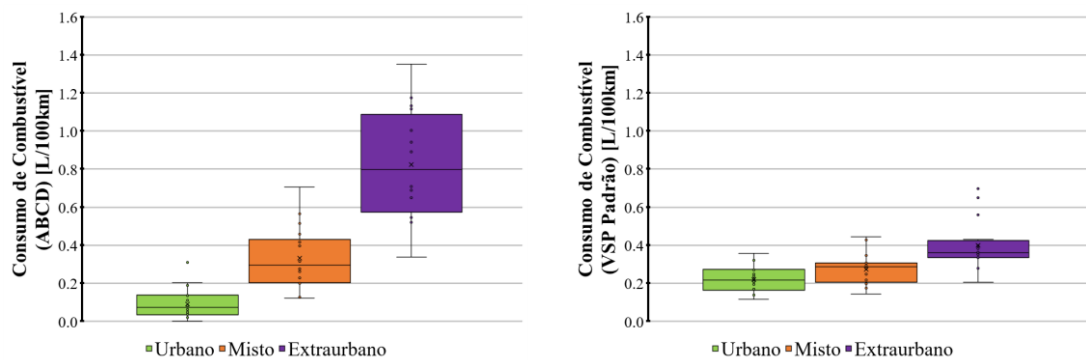


Figura 64- Consumo médio de Combustível obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);

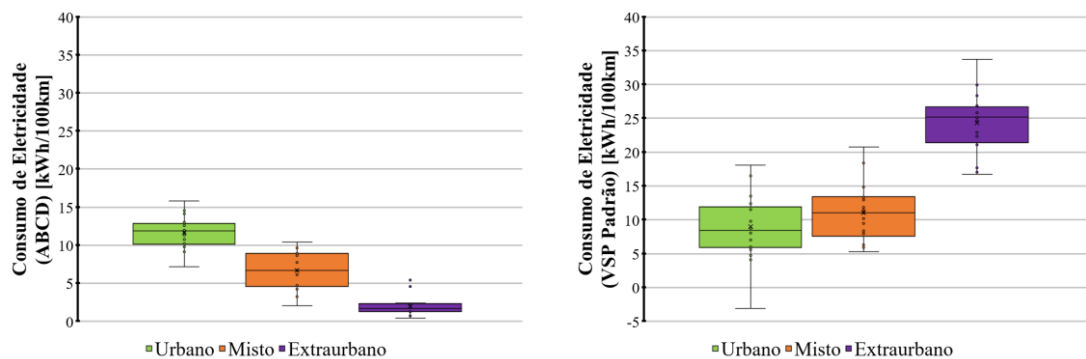


Figura 65- Consumo médio de eletricidade obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);

Como se demonstra na Figura 64 e na Figura 65, o Método ABCD, sendo um método capacitado de reconhecer os modos de propulsão em cada instante, consegue adaptar-se

novamente melhor às diferentes tipologias dos ciclos de condução, o que permite obter um consumo médio de combustível e eletricidade coerente o que seria espetável. Em contrapartida, o Método VSP Padrão é incapaz de demonstrar a relação entre o consumo de combustível e o consumo de eletricidade, justificado pelo facto de este método analisar o veículo como se este fosse dotado apenas de uma fonte térmica ou elétrica.

Todavia, verifica-se um consumo de combustível bastante reduzido derivado à ausência do funcionamento do motor térmico nas viagens que deram origem ao consumo médio por modo de VSP, pelo qual este pode estar a ser subestimado relativamente à realidade.

Relativamente às emissões de gases poluentes, mantendo as condições enunciadas, demonstra-se na Figura 66, na Figura 67, na Figura 68 e na Figura 69 novamente em forma de Boxplot, a emissão cada de gás poluente de acordo com o método aplicado e aferente à tipologia de cada ciclo de condução, respetivamente.

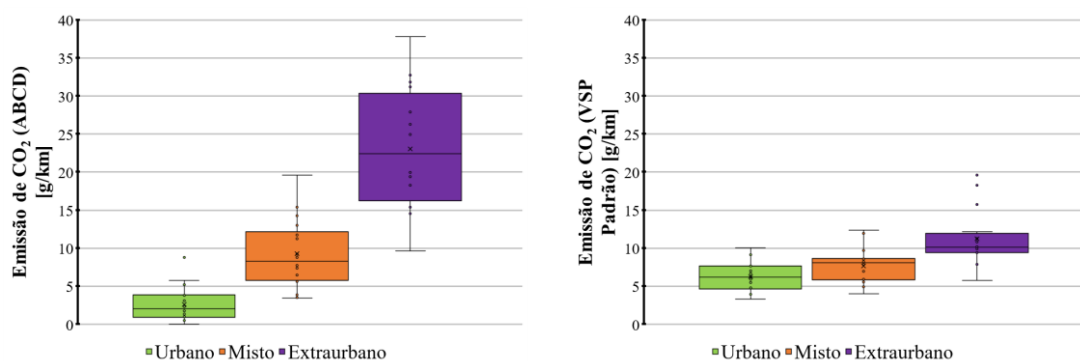


Figura 66- Emissão de CO₂ obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);

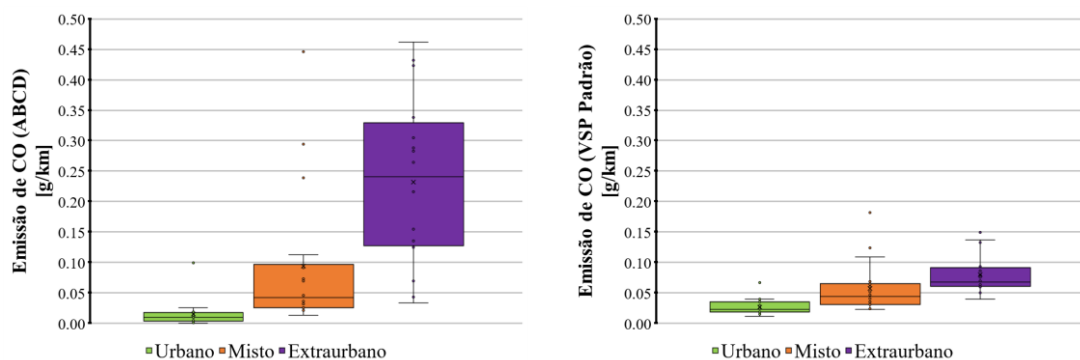


Figura 67- Emissão de CO obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão, (Veículo B);

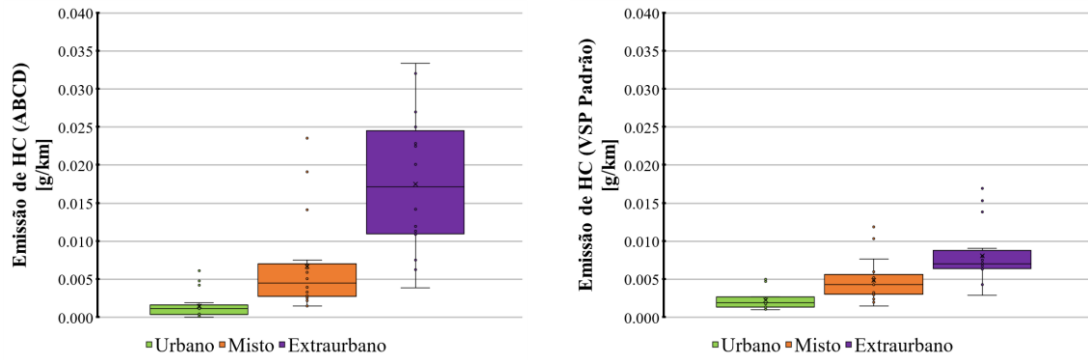


Figura 68- Emissão de HC obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);

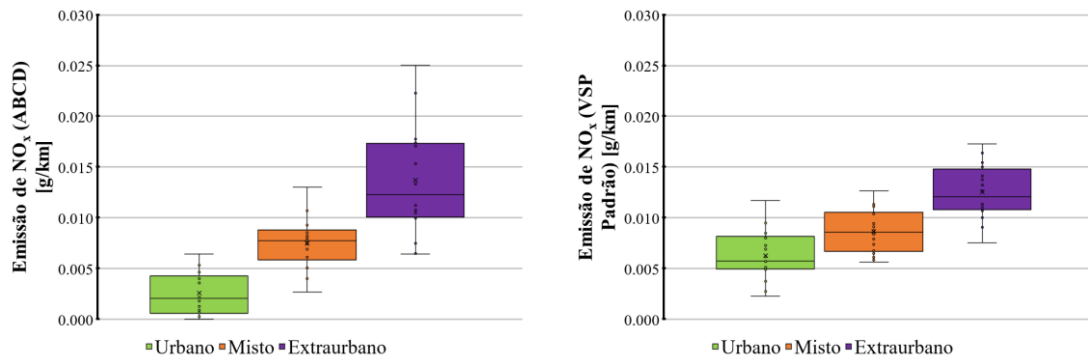


Figura 69- Emissão de NO_x obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);

Através da Figura 66, da Figura 67, da Figura 68 e da Figura 69 verifica-se que as emissões de gases poluentes estimadas através do Método ABCD são superiores às apresentadas pelo Método VSP Padrão, sendo coerente com a estimativa de combustível, todavia as emissões podem estar a ser subestimadas à semelhança do consumo.

Por fim, analisa-se o UF aferente ao veículo B, no qual prevê-se um valor constante, à semelhança do veículo A. Apresenta-se na Figura 70, em forma de Boxplot, o UF conforme o método aplicado e aferente à tipologia de cada ciclo de condução.

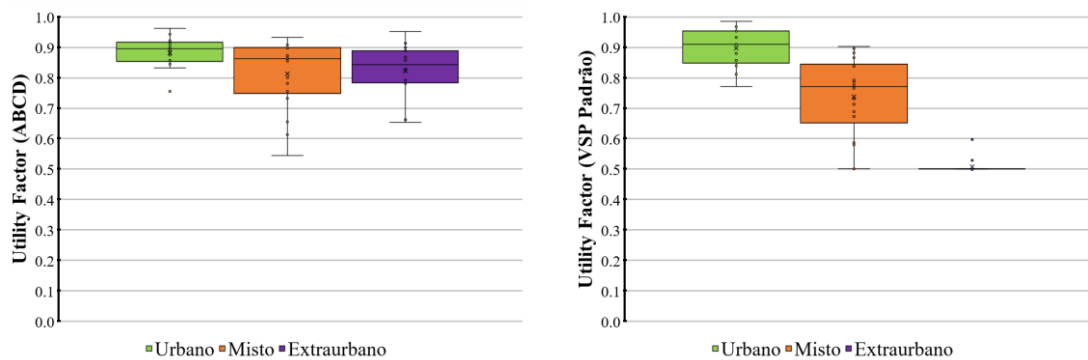


Figura 70- Utility Factor obtido através da aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão (Veículo B);

Através da Figura 70, à semelhança do que já se tinha verificado no Veículo A, verifica-se que o Método ABCD apresenta uma média do UF constante nas três tipologias de ciclo de condução, coerente com a definição de UF individual, demonstrando apenas pequenas variações apesar dos diferentes tipos de ciclos de condução realizados. Em contrapartida, o Método VSP Padrão, demonstra uma variação significativa da média entre as tipologias dos ciclos de condução, incoerente com a definição de UF individual

Todavia, é possível ainda comparar o resultado obtido com o resultado expectável demonstrado pela curva normalizada para a realização dos ciclos WLTP [40]. Neste sentido demonstra-se na Figura 71, a comparação entre a curva WLTP com a curva criada através dos resultados obtidos com o Método ABCD e o Método VSP Padrão.

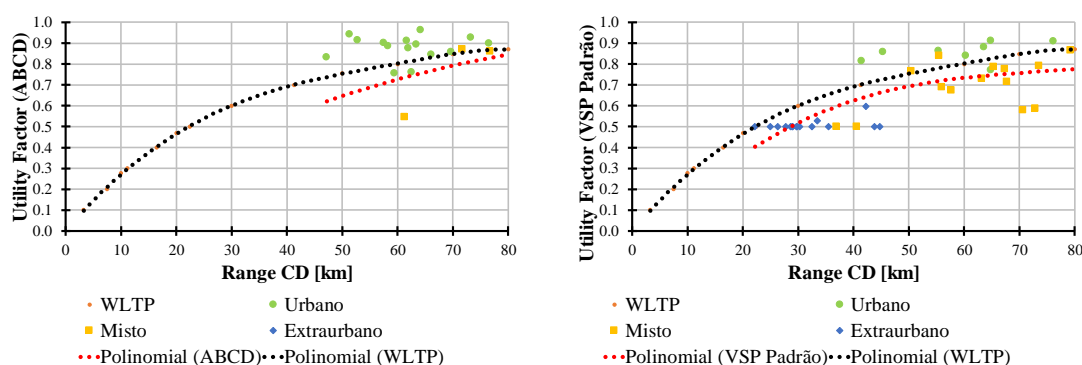


Figura 71- Comparação da curva WLTP com a curva criada através dos resultados obtidos com o Método ABCD e o Método VSP Padrão; (Veículo B)

Com base na Figura 71, verifica-se que a aproximação da curva obtida por ambos os métodos, apresenta uma baixa precisão quando comparada com a curva normalizada. Por outro lado, é possível verificar o mesmo padrão presente nos resultados aferentes ao veículo A, isto é, distâncias elétricas estimadas através do Método VSP Padrão reduzidas e distâncias elétricas estimadas pelo Método ABCD muito superiores ao normal, apesar que o Método VSP Padrão neste caso apresenta mais coerentes com o que seria expectável dado que a distancia elétrica do veículo é de 40 km.

Capítulo 4 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

A complexidade associada ao sistema de gestão energética de veículo híbrido plug-in, coloca em questão qual é a energia a ser usada em cada instante quando o veículo é exposto a condições reais de condução. Neste sentido, o presente trabalho desenvolve uma metodologia capaz de prever o SOC do veículo e alocar os diferentes modos de propulsão usados, independentemente da estratégia utilizada pelo sistema de gestão de propulsão que coordena o uso das fontes de propulsão (térmica e elétrica), de uma forma independente ou combinada, com base em apenas dados dinâmicos medidos em ciclos de condução reais e através dos quais se cria regras que indicam qual é a fonte de propulsão utilizada durante a fase de descarregamento da bateria (CD).

Foram recolhidos dados de dois veículos híbridos plug-in utilizando um PEMS, sendo estes sujeitos à realização de testes em condições de condução reais. O desenvolvimento e aplicação do método indireto de previsão do consumo de energia elétrica, originou resultados que demonstram uma correlação excelente entre o SOC estimado e o SOC medido ($R^2 > 0,99$), como também evidenciam um declive linear muito perto de um.

Quanto ao objetivo de prever a fonte (ou fontes) de energia segundo a segundo, foi desenvolvido um algoritmo genérico utilizando apenas informação dinâmica (VSP, Velocidade e Aceleração) de dois ciclos de condução realizados em cada veículo quando estes dispunham de um SOC máximo. Os resultados obtidos, indicam que o algoritmo desenvolvido possui uma estimativa com um acerto médio de 82,2% do período total do ciclo de condução analisado. Apesar de ser uma estimativa bastante exata, o erro associado é devido à dificuldade inerente à diferenciação dos modos de propulsão “B” e “D, no qual a fonte de propulsão térmica pode ser utilizada de forma independente ou ser auxiliada pela fonte de propulsão elétrica, indicando assim por vezes a sobreposição de intervalos dinâmicos.

Através da comparação realizada entre o método desenvolvido (ABCD), o Método VSP Padrão e a realidade, comprovou-se que o Método ABCD consegue prever os parâmetros em estudo (consumo energético, emissão de gases poluentes e *Utility Factor*) relativamente à realidade com um desvio médio de $29,26 \pm 18,9$ % enquanto o Método VSP Padrão

consegue prever os parâmetros em estudo relativamente à realidade com um desvio médio de $27,59 \pm 16,4$ %. Este resultado é pouco preocupante, dado que, quando se expôs os métodos às condições reais, tendo em conta os modos de propulsão registados durante o ciclo de condução real, verificou-se que o Método ABCD consegue prever os parâmetros em estudo relativamente à realidade com um desvio médio de $23,54 \pm 20,7$ %, enquanto o Método VSP Padrão consegue prever os parâmetros em estudo relativamente à realidade com um desvio médio de $68,63 \pm 21,9$ %.

Face a aplicação do Método ABCD e do Método VSP Padrão a perfis de velocidade aleatórios, diferenciados pela sua tipologia (Urbano, Misto e Extraurbano), verificou-se que o Método ABCD, consegue demonstrar constantemente, independentemente do parâmetro em estudo, coerência com o funcionamento de um PHEV, tendo demonstrado em todos os parâmetros analisados o padrão que seria de esperar de acordo com a tipologia do ciclo de condução. Em contrapartida, o Método VSP Padrão ficou aquém do expectável demonstrando a sua dificuldade da adaptação à variação das fontes de propulsão como era espectável desde o princípio.

Torna-se então possível afirmar, que o objetivo imposto foi atingido, tendo desenvolvido um método genérico baseado em apenas dados dinâmicos capazes de se adaptar a qualquer tipologia de viagem e com um desempenho superior ao Método VSP Padrão.

O desenvolvimento futuro inclui o melhoramento do Método ABCD, com a utilização de algoritmos que permitam otimizar de uma forma computacional os intervalos dinâmicos que limitam cada zona de propulsão, desenvolver uma abordagem mais específica para cada veículo podendo-se refletir num erro relativo inferior ao apresentado, modificar abordagem de modo a introduzir-se a influencia de diferentes perfis de carregamento e por fim estender a análise a condições que permitem estudar a influência dos equipamentos de climatização.

Concluindo então que, o Método ABCD desenvolvido no presente trabalho, pode ser visto como uma melhoria ao Método VSP Padrão, capaz de reconhecer os tipos de propulsão em uso em cada instante. Este método ainda pode ser introduzido em conjunto com as atuais ferramentas de análise dos dados, utilizadas pela Comissão Europeia que não possuem informação acerca do sistema de gestão de propulsão, sendo que esta informação pode ser útil para a metodologia EMROAD, na construção das janelas utilizadas na análise de dados.

Capítulo 5 – Referências Bibliográficas

- [1] Qiancheng Ma. NASA GISS: Science Briefs: Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide 1998. https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/ma_01/ (acedido em 5 de Abril de 2020).
- [2] Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea L.L.W. AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. 2019.
- [3] Bereiter B., Eggleston S., Schmitt J., Nehrbass-Ahles C., Stocker T.F., Fischer H., Kipfstuhl S., Chappellaz J. Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present. *Geophysical Research Letters* 2015;42:542–9. <https://doi.org/10.1002/2014GL061957>.
- [4] CAIT Climate Data Explorer via. Climate Watch. Carbon dioxide (CO₂) emissions by sector or source, World 2020. <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-dioxide-co2-emissions-by-sector-or-source> (Acedido em 5 de Abril de 2020).
- [5] Sims R., Schaeffer R., Creutzig F., Cruz-Núñez X., D’Agosto M., Dimitriu D., Meza M.J.F., Fulton L., Kobayash S., Lah O., McKinnon A., Newman P., Ouyang M., Schaue J.J., Sperling D., Tiwari G. 2014: Transport. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. In: Deakin E, Ribeiro SK, editors., United Kingdom and New York: Cambridge University Press; 2014.
- [6] Comissão Europeia. Regulamento (Ue) 2019/631 do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de Abril De 2019 que estabelece normas de desempenho em matéria de emissões de CO₂ dos automóveis novos de passageiros e dos veículos comerciais ligeiros novos e que revoga os Regulamentos (CE) n.o 443/2009 e (UE) n.o 510/2011.
- [7] Comissão Europeia. Transport emissions 2016. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en (Acedido em 5 de Abril de 2020).
- [8] Comissão Europeia. Regulamento (Ue) 2018/1832 Da Comissão de 5 de novembro de 2018 que altera a Diretiva 2007/46/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, o Regulamento (CE) n.o 692/2008 da Comissão e o Regulamento (UE) 2017/1151 da Comissão com o objetivo de melhorar os ensaios e procedimentos de homologação no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais,

incluindo os que dizem respeito à conformidade em circulação e às emissões reais de condução, e de introduzir dispositivos para a monitorização do consumo de combustível e energia elétrica.

- [9] Varella R., Giechaskiel B., Sousa L., Duarte G. Comparison of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) with Laboratory Grade Equipment. *Applied Sciences* 2018;8:1633. <https://doi.org/10.3390/app8091633>.
- [10] Comissão Europeia. Regulamento (Ue) 2017/1151. Regulamento (EU) 2017/1151 Da Comissão De 1 De Junho De 2017 Que Completa O Regulamento (CE) N.O 715/2007 do Parlamento Europeu e do Conselho relativo à homologação dos veículos a motor no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 5 e Euro 6) e ao acesso à informação relativa à reparação e manutenção de veículos, que altera a Diretiva 2007/46/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, o Regulamento (CE) n.o 692/2008 da Comissão e o Regulamento (UE) n.o 1230/2012 da Comissão, e revoga o Regulamento (CE) n.o 692/2008 da Comissão.
- [11] Pavlovic J., Ciuffo B., Fontaras G., Valverde V., Marotta A. How much difference in type-approval CO2 emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2018;111:136–47. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.02.002>.
- [12] Trentadue G., Garcia M.O., Galassi M.C., Carriero M., Valverde V. On-road emissions and energy efficiency assessment of a plug-in hybrid electric vehicle. 2019. <https://doi.org/10.2760/436839>.
- [13] Patrascu D. How Portable Emissions Measurement Systems Work 2018. https://www.autoevolution.com/news/how-portable-emissions-measurement-systems-work-127086.html#agal_3 (Acedido em 14 de Abril de 2020).
- [14] Duarte G.O., Gonçalves G.A., Farias T.L. A Methodology to Estimate Real-world Vehicle Fuel Use and Emissions based on Certification Cycle Data. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2014;111:702–10. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.104>.
- [15] Varella R.A., Duarte G., Baptista P., Sousa L., Mendoza Villafuerte P. Comparison of Data Analysis Methods for European Real Driving Emissions Regulation. *SAE Technical Papers* 2017;2017-March. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0997>.
- [16] CarEmissionsTestingFacts.eu. RDE: What is the real driving emissions test? 2016.

- [17] Prati M.V., Meccariello G., Della Ragione L., Costagliola M.A. Real Driving Emissions of a Light-Duty Vehicle in Naples. Influence of Road Grade. SAE Technical Papers 2015;2015. <https://doi.org/10.4271/2015-24-2509>.
- [18] Suarez-Bertoa R., Mendoza-Villafuerte P., Bonnel P., Lilova V., Hill L., Perujo A., Astorga C. On-road measurement of NH₃ and N₂O emissions from a Euro V heavy-duty vehicle. Atmospheric Environment 2016;139:167–75. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.035>.
- [19] Hausberger S., Lipp S. Evaluation Methods for Real Drive Emission Tests of LDV for a Future Legislation Emissions in Real Driving Situations Demands for PEMS-Tests at LDV 2017:1–11.
- [20] Jiménez-Palacios J.L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and tunable infrared laser differential absorption spectrometer remote sensing. Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [21] Wang Y., Boggio-Marzet A. Evaluation of eco-driving training for fuel efficiency and emissions reduction according to road type. Sustainability (Switzerland) 2018;10. <https://doi.org/10.3390/su10113891>.
- [22] Hofman T. Hybrid drive train technologies for vehicles. Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Towards Zero Carbon Transportation 2014:567–81. <https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.567>.
- [23] Jonatan Sarmento. Conheça os tipos de carro híbrido que existem atualmente no mercado 2019.
- [24] Gonder J., Markel T. Energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles. SAE Technical Papers 2007;2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0290>.
- [25] Schouten N.J., Salman M.A., Kheir N.A. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles. IEEE Transactions on Control Systems Technology 2002;10:460–8. <https://doi.org/10.1109/87.998036>.
- [26] Liu J., Peng H. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle. IEEE Transactions on Control Systems Technology 2008;16:1242–51. <https://doi.org/10.1109/TCST.2008.919447>.
- [27] Schmid R., Bürger J., Bajcinca N. A comparison of PMP-based Energy Management Strategies for Plug-in-Hybrid Electric Vehicles. IFAC-PapersOnLine 2019;52:592–

7. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.094>.
- [28] Sun C., Sun F., He H. Investigating adaptive-ECMS with velocity forecast ability for hybrid electric vehicles. *Applied Energy* 2017;185:1644–53. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.026>.
- [29] Xiong R., Cao J., Yu Q. Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle. *Applied Energy* 2018;211:538–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.072>.
- [30] Xie S., Hu X., Qi S., Lang K. An artificial neural network-enhanced energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. *Energy* 2018;163:837–48. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.139>.
- [31] Riemersma I., Mock P. Too low to be true? How to measure fuel consumption and CO2 emissions of plug-in hybrid vehicles, today and in the future. 2017.
- [32] Bradley T.H., Quinn C.W. Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors. *Journal of Power Sources* 2010;195:5399–408. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.02.082>.
- [33] Raghavan S.S., Tal G. Influence of user preferences on the revealed utility factor of plug-in hybrid electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal* 2020;11. <https://doi.org/10.3390/wevj11010006>.
- [34] Wu X., Aviquzzaman M., Lin Z. Analysis of plug-in hybrid electric vehicles' utility factors using GPS-based longitudinal travel data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2015;57:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.05.008>.
- [35] Smart J., Bradley T., Salisbury S. Actual versus estimated utility factor of a large set of privately owned chevrolet volts. *SAE International Journal of Alternative Powertrains* 2014;3:30–5. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1803>.
- [36] Paffumi E., De Gennaro M., Martini G. Alternative utility factor versus the SAE J2841 standard method for PHEV and BEV applications. *Transport Policy* 2018;68:80–97. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.02.014>.
- [37] Varella R.A. Development of a novel methodology for connecting real driving emissions to light-duty vehicle certification test procedures 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31424.89609>.
- [38] Varella R.A., Faria M. V., Mendoza-Villafuerte P., Baptista P.C., Sousa L., Duarte G.O. Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data

- analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions. *Science of the Total Environment* 2019;658:879–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.053>.
- [39] Zhai H., Frey H.C., Roupail N.M. A vehicle-specific power approach to speed- and facility-specific emissions estimates for diesel transit buses. *Environmental Science and Technology* 2008;42:7985–91. <https://doi.org/10.1021/es800208d>.
- [40] Frey H.C., Roupail N.M., Zhai H., Farias T.L., Gonçalves G.A. Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2007;12:281–91. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.03.003>.
- [41] Khan T., Frey H.C. Geospatial variation of real-world emissions from a passenger car. *Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition, AWMA 2016*;4:2799–822.
- [42] Duarte G.O., Gonçalves G.A., Farias T.L. Analysis of fuel consumption and pollutant emissions of regulated and alternative driving cycles based on real-world measurements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2016;44:43–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.009>.
- [43] Society of Automotive Engineers. J2841 - Utility Factor Definitions for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Travel Survey Data. SAE International 2010.
- [44] Society of Automotive Engineers. J1711 - Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles, Including Plug-in Hybrid Vehicles. SAE International 2010.
- [45] R.J. Neufeld, Chris Twigg. Ethanol heating values 2005. <https://chemeng.queensu.ca/courses/CHEE332/> (Acedido em 12 de Setembro de 2020).

Página deixada propositadamente em branco

Anexos

Anexo I – Artigos Científicos redigidos com base na presente Tese Final de Mestrado

- Campino, M., Henriques, N., & Duarte, G. (2020). Energy Assessment of a Plug-in Hybrid Vehicle Propulsion Management System. KnE Engineering, 5(6), 833–845. <https://doi.org/10.18502/keg.v5i6.7103> - **ICEUBI 2019**
- Campino, M., Henriques, N., Duarte, G., Rolim, C., Baptista, P. (2020). Disaggregation of PHEV energy use under different energy management strategies – **EVS33 2020**
- Campino, M., Henriques, Varella, R., Baptista, P. Duarte, G. (2020). Development of indirect method for the performance assessment of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle propulsion management system. – **Journal of Power Sources** (Em revisão)



Conference Paper

Energy Assessment of a Plug-in Hybrid Vehicle Propulsion Management System

Miguel Campino¹, Nuno Henriques¹, and Gonçalo Duarte²¹ADEM/ISEL/IPL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal²ADEM/ISEL/IPL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal/IN+, Center for Innovation, Technology and Policy Research – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

Abstract

Plug-In hybrid vehicles have a complex propulsion system management, trying to manage the conventional and electric motorization in the most energy efficient way according to the driving dynamics, topography and battery charge state. In this sense, the aim of this work is to analyze the energy performance of plug-in hybrid vehicles, based on road tests, under real conditions of use, focusing on the management system of the two energy sources present, varying the level of battery charge at the start of the test to visualize the impact of this change. To complement the analysis and in order to better understand the operation of the management system, a methodology for applying the VSP parameter is used, which allows the load state to be approximated according to the vehicle's operating mode, alternating between the three modes according to the conditions at the time in question, prioritizing the electric motor when the state of charge of the battery is maximum. These results confirm the fact that plug-in hybrid vehicles allow better electricity management due to the diversity of external or internal charging sources, which makes this type of vehicle more efficient and versatile than conventional hybrids, allowing a reduction in fossil fuel consumption and consequently a reduction in the emission of pollutant gases, making this type of vehicle a very competitive alternative in the transport sector in view of the current challenges due to the goals present in the current European regulations.

Keywords: Plug-in hybrid vehicles, Energy assessment, Climatization systems, Load support, State of charge

Corresponding Author:

Miguel Campino
mccampino@dem.isel.pt

Received: 26 November 2019

Accepted: 13 May 2020

Published: 2 June 2020

Publishing services provided by
Knowledge E

© Miguel Campino et al. This article is distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use and redistribution provided that the original author and source are credited.

Selection and Peer-review under the responsibility of the ICEUBI2019 Conference Committee.

1. Introduction

The continuous deterioration of environmental conditions requires society to seek more environmentally friendly solutions in order to preserve the quality paradigm of human life. Over the last decade, international organizations have introduced new legislation which have created new challenges for the automotive industry in order to produce vehicles with lower fossil fuel consumption and consequently lower pollutant

OPEN ACCESS

How to cite this article: Miguel Campino, Nuno Henriques, and Gonçalo Duarte, (2020), "Energy Assessment of a Plug-in Hybrid Vehicle Propulsion Management System" in *International Congress on Engineering — Engineering for Evolution*, KnE Engineering, pages 833–845. Page 833
DOI 10.18502/keg.v5i6.7103

emissions. It is noted that in 2000, the emissions of Carbon dioxide (CO₂) for newly sold vehicles were on average 170,2 gCO₂/km, in 2018 were 120,4 gCO₂/km and it is intended to achieve in Europe the goal of 95 gCO₂/km by 2020 [1]. These measures come in the context of reducing the greenhouse gases responsible for climate change currently being experienced. To meet these challenges, as the conventional transport sector represents on average 10% of the total CO₂ emit globally [2], the automotive industry has been forced to design more efficient thermal engines, more sophisticated emission control systems and hybrid or fully electric vehicles. A hybrid vehicle is an interesting solution for optimizing the propulsion system and reducing emissions due to the complement of the electric motor with an internal combustion engine allowing to keep the thermal motor running at low revs, or to inhibit its operation in situations of stable and low throttle driving. This allows a reduction in fuel consumption, a reduction in the emission of pollutants and is not exclusively dependent on electricity. With the development of the technology, different types of hybrid vehicles were introduced, differing in the management between the use of the electric motor and the internal combustion engine. Parallel hybrids use the electric motor and the internal combustion engine generate traction to move the wheels of the vehicle; in series hybrids the electric motor generates traction and the internal combustion engine is used as a backup to recharge the battery and; full hybrids, being the most common type of vehicle, characterized by the use of the electric motor and the internal combustion engine depending on an instantaneous assessment of the vehicle's condition and route or the user's preference.

Battery charging of a hybrid vehicle is also a feature that makes possible to differentiate between conventional hybrid vehicles and plug-in hybrid vehicles. Conventional hybrid vehicles only have the ability to recharge the battery from internal sources, namely thermal engine and regenerative braking, while plug-in hybrid vehicles have the ability to recharge the battery from internal sources such as conventional hybrid vehicles but also from external sources by connecting the car battery to a charging station, similarly to an electric vehicle.

As a result of the introduction of new standards for vehicle certification in Europe [3], using real-time monitoring under real driving conditions (Real Driving Emission), the quantification of energy flows (fuel and electricity both from sources outside the vehicle) in a plug-in vehicle is crucial in order to attribute the actual energy impacts and emissions associated with its use. However, although monitoring fuel consumption and emission over a road test is currently well defined in methodological terms and the equipment to be used [4], monitoring of electrical consumption implies specific care

(magnitude of voltage and current involved) and the installation of specific equipment and technical care to ensure safety.

Consequently, this work explores the development of indirect techniques to estimate at each second of driving, under real-world conditions, the electricity consumption using information available on the OBD interface, which indicates at 1 Hz the state of charge of the battery (SOC).

2. Materials and Methodology

2.1. Vehicle

In this study a Plug-In hybrid vehicle was tested under real driving conditions, and its main characteristics are shown in Table 1. It is a light passenger vehicle whose typology fits into the vehicle SUV category.

TABLE 1: Characteristics of the vehicle under study [5];

Vehicle	Vehicle A
Displacement	1499 cc
Power	221 hp
Transmission / Gearbox	Automatic- 6
Vehicle Mass [kg]	1635
Fuel	Otto
Battery [kWh]	7.6

2.2. Test Cycle

A fixed test cycle, as shown in Figure 1, was performed during the test in order to meet the necessary conditions for interpreting and evaluating the management of the integrated propulsion system according to the state of charge of the battery.

The tests were carried out in the Lisbon metropolitan area over a two-hour period (around 7200 s of data collection per trip), in which the car was initially exposed to an urban environment, then to a highway environment and finally, again exposed to an urban environment. The tests were performed during the morning and late afternoon, in order to avoid the influence of external factors on the collected data, such as temperature peaks and excess traffic. Figure 2 is an example of a test cycle where the different conditions to which the vehicle is exposed are evident, which shows the use of different driving modes by the vehicle propulsion management system.

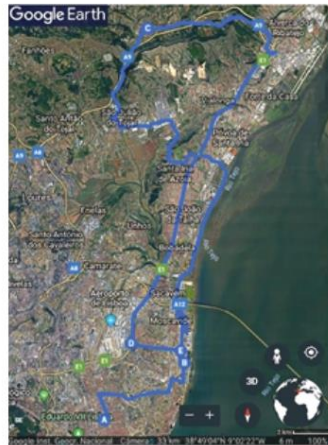


Figure 1: Path performed during the tests performed [6];

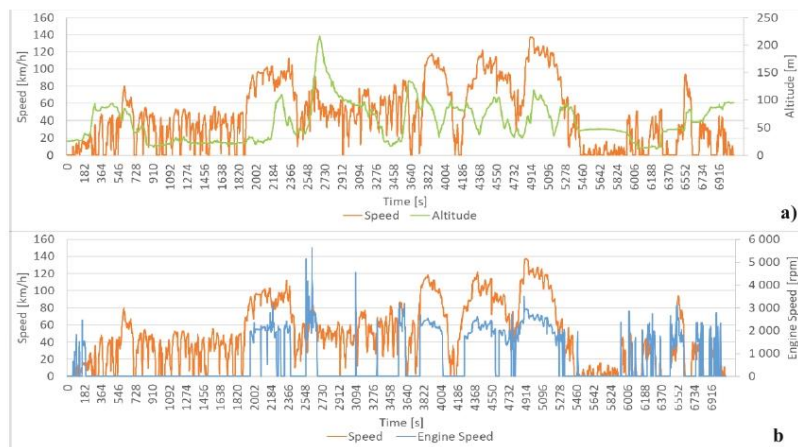


Figure 2: Example of a test cycle performed, divided into three phases (urban, highway, urban). (a) speed and altitude as a function of time; (b) engine speed and speed as a function of time;

2.3. Portable Emission Measurement System

The measurement equipment used to obtain the desired data was a portable emission measurement system (PEMS). This system provides detailed instantaneous vehicle information throughout the test and consists of an On-Board Diagnostic (OBD) reading port, a Global Positioning System (GPS) with barometric altimeter and an exhaust gas analyzer, as shown in Figure 3. The OBD interface reader allows monitoring of

parameters associated with the internal combustion engine, but also the state of charge of the battery (SOC) throughout the test trip. All devices are connected to a laptop, collecting at 1Hz and synchronizing the data through LabView software in a program designed for this purpose. This way it is possible to acquire the engine data, vehicle dynamics, road topography and all the involved vehicle parameters.

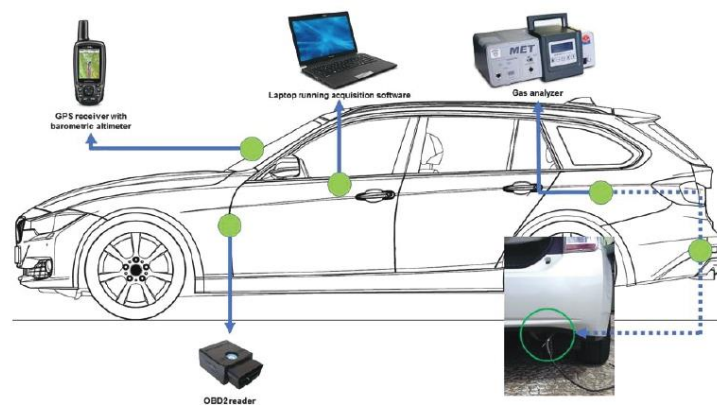


Figure 3: Major PEMS components installed in vehicles, [7].

2.4. On road data processing

The data processing used to achieve the previously determined objectives uses the Vehicle Specific Power (VSP) methodology, calculated at each second of each test trip. This parameter is defined as a road load model and provides an estimate of the instantaneous power on the wheel necessary to overcome vehicle to ground friction, aerodynamic resistance and increase vehicle kinetic energy and potential [8]. Although VSP is a widely used parameter for determining vehicle emissions [9, 10], supported

by other parameters it will be used in this case to estimate the battery state of charge. Therefore, this parameter can be calculated according to Equation 1.

Vehicle Specific Power

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{rolling} \times v + F_{aerodynamics} \times v}{m} = \\
 &= \frac{\frac{d}{dt}(\frac{1}{2} \times m \times (1 + \epsilon_i) \times v^2 + m \times g \times h) + C_R \times m \times g \times v + \frac{1}{2} \times \rho_a \times C_D \times A \times (v + v_w)^2 \times v}{m} \quad (1) \\
 &= v \times (a \times 1 + \epsilon_i) + g \times grade \times g \times C_R + \frac{1}{2} \times \rho_a \times \frac{C_D \times A}{m} \times (v + v_w)^2 \times v
 \end{aligned}$$

Where v , corresponds to vehicle speed, a corresponds to vehicle acceleration, ϵ_i corresponds to the mass factor, g is the gravitational constant (9,81 m/s²), $grade$ corresponds to the relationship between altitude and distance traveled, C_R corresponds to the coefficient of friction between vehicle and ground, C_D corresponds to the drag coefficient, ρ_a corresponds to the outside air density, A corresponds to the frontal area of the vehicle, m corresponds to the mass of the vehicle and v_w corresponds to the wind speed striking the vehicle. Equation 1 can be further simplified by taking into account typical vehicle coefficients and VSP is calculated according to Equation 2.

$$VSP = v \times (1.1 \times a + 9.81 \times grade + 0.132) + 0.000302 \times (v + v_w)^2 \times v \quad (2)$$

The calculation of the VSP value is performed every second of the trip and is typically divided into fourteen modes, or more for easier understanding, into three categories as shown in Table 2.

TABLE 2: Vehicle Specific Power Modes [11]

Vehicle driving	VSP mode	Definition (kW/ton)
Deceleration or downhill	1	VSP < -2
	2	-2 ≤ VSP < 0
Idle	3	0 ≤ VSP < 1
Cruising, acceleration, or uphill	4	1 ≤ VSP < 4
	5	4 ≤ VSP < 7
	6	7 ≤ VSP < 10
	7	10 ≤ VSP < 13
	8	13 ≤ VSP < 16
	9	16 ≤ VSP < 19
	10	19 ≤ VSP < 23
	11	23 ≤ VSP < 28
	12	28 ≤ VSP < 33
	13	33 ≤ VSP < 39
	14	39 ≤ VSP

Using VSP modes makes possible to stratify vehicle analysis and verify vehicle behavior in different VSP modes, taking into account only parameters from vehicle dynamics. For example, the average fuel consumption in each VSP mode, with low or zero fuel consumption expected in the first three VSP modes and increasing fuel consumption in the other modes, as shown in Table 3 in section 3.1.

After the VSP data is properly analyzed and processed, it is possible to apply the methodology of approximation of the energy consumption based on the VSP. This is a methodology for approximating the battery state of charge of the vehicle, taking into account its operating mode, electric, electric-thermal and only internal combustion engine based only on VSP modes, fuel consumption, vehicle speed, engine speed and trend curves created from actual energy consumption.

The approach taken to analyze the battery SOC estimate requires obtaining a relation between the change in SOC over a specific time period in relation to the mean value of VSP in this interval. Therefore, Plug-in operation modes must be first identified. Charge depleting was set to be above 10% SOC level, since below this value the vehicle energy management system maintains this charge sustaining state, using mostly the internal combustion engine.

Consideration was also given to analyzing small load state intervals, in which there were slight variations in VSP, this way it is analyze the SOC relating to the engine speed in tests performed when the vehicle SOC was maximum, consisting of load state analysis when the internal combustion engine is off ($\text{rpm} = 0$) and load state analysis when the internal combustion engine is operating ($\text{rpm} \neq 0$). From this analysis, several points were obtained regarding the variation of the SOC level in relation to the average VSP, allowing the creation of two trend lines, according to the analysis in question.

It is also taken into account its electrical, electric-thermal and only thermal mode of operation based solely on VSP modes, fuel consumption and engine speed through a second-by-second comparative analysis of fuel consumption at the time under study compared to the average consumption of VSP mode of that second, trying to differentiate between electric-thermal and only thermal operation.

3. Results and Discussion

3.1. Indirect method of assessing electrical consumption

Figure 4 presents the behavior of the battery SOC level along the road tests, indicating the energy consumed or regenerated as a function of time, as well as the use of the

internal combustion engine during the trip. Thus, in the tests in Figure 4 shown on the left, the vehicle started the full load test, distinguishing the initial phase of the charge depleting test. In Figure 4 b) and d), it is possible to observe a high use of the internal combustion engine, resulting from a low charge sustaining battery level.

In Figure 4 b) there was a dependence of the internal combustion engine of 63.5% and in Figure 4 d) the use of the internal combustion engine was of 58.8%. This small difference may be justified by the fact that Figure 4 d) is a shorter trial than Figure 4 b).

Comparatively, Figure 4 a) results in a thermal engine use of only 32.8%, and in the case of Figure 4 c) a thermal engine utilization of 45.3%. The difference between the tests is justified by the increase in traffic intensity and the use of higher power at the end of the test, leading to greater use of the internal combustion engine.

On the other hand, the fact that starting the trip with the battery fully charged, is a remarkable reduction of approximately 30% of the internal combustion engine utilization when compared to Figures 4 b) and d), resulting in a lower fuel consumption and lower pollutant emissions.

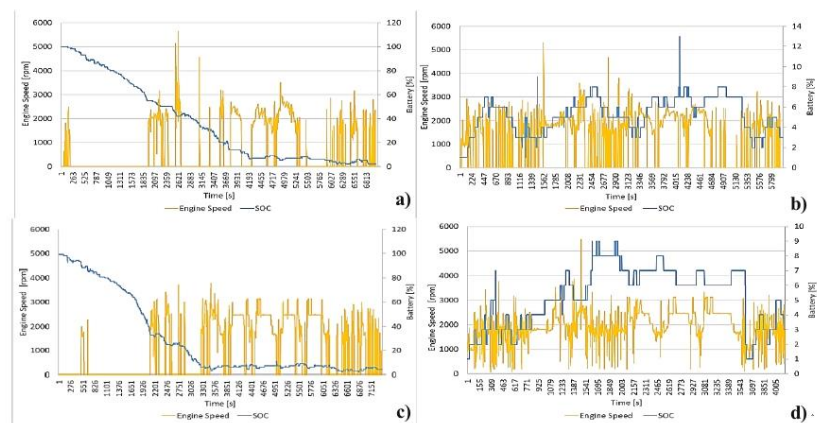


Figure 4: Graphical representation of the variables Frequency and Capacity of the Battery as a function of the time of the tests carried out in Vehicle B. a) High Battery; b) Low Battery; c) High Battery; d) Low Battery;

The SOC estimates based on the VSP require a relation between the variation of SOC over a time period and the VSP in the same period. This was analyzed in the two trips that took place when the initial capacity of the vehicle battery was maximum, consisting of the analysis of the state of charge when the engine speed was zero and the state analysis load when the motor speed was nonzero.

Based on the described methodology, it was possible to obtain the relation between the variation of SOC per unit of time and the value of VSP, according to Figure 5,

composed by a trend line of the various points selected from the two trials based on the assumptions considered previously.

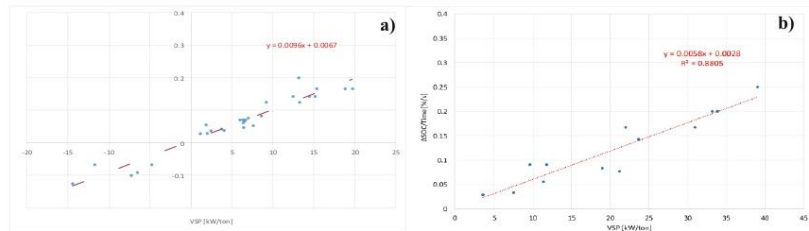


Figure 5: Trend line between the variation of the load state over time and the mean value of the VSP in this interval. a) RPM = 0; b) RPM ≠ 0;

According to Figure 5, the methodology used may introduce some error, since the results are entirely dependent on the amount of points obtained through the collection, as it happens in the non-zero RPM situation, where it is perceived that linearity follows a trend but for lack of points is not fully confirmed.

TABLE 3: Average consumption by VSP mode and the respective standard deviation.

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
St. Deviation	0.248	0.192	0.108	0.397	0.538	0.691	0.871	0.974	1.178	1.133	1.277	1.340	1.268	1.496
Average	0.052	0.053	0.019	0.166	0.300	0.480	0.770	1.162	1.591	1.836	2.471	2.935	3.262	3.910

Based on the relations obtained in Figure 5 and again taking into account the methodology described and the three possible hypotheses presented (electric, electric-thermal and thermal), considering also the average fuel consumption according to each VSP mode as shown in Table 3, it became possible to approach the charge state as shown in Figure 6.

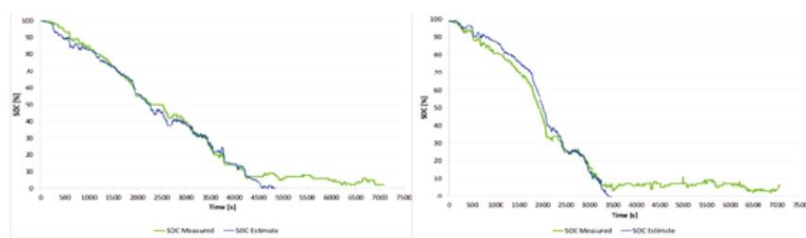


Figure 6: Approximation of charge state in tests performed with maximum battery capacity;

In order to compare the real SOC level with the estimated SOC, a graphical representation of was made, presenting a linear relation, close to the equation of line $y = x$ as expected and indicating the accuracy of the approach made, visible in Figure 7.

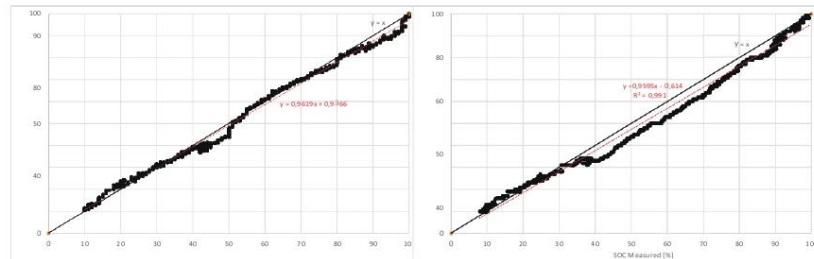


Figure 7: Comparison between actual charge state and approximate charge state;

Therefore, in both trips tested, the SOC estimate provide values of R^2 around 0.99, which means that by determining the VSP, it is possible to accurately recreate the evolution of the battery SOC level over a test by knowing the initial state of charge. This information indicates that the method tested distinguishes points of use of the electric motor, the combination of the electric and internal combustion engine, and only thermal, providing a good estimate of regeneration. Consequently, this method allows to accurately estimate the electric consumption of the car from the total capacity of the battery.

3.2. Qualitative assessment between direct measurement of electrical consumption and estimation

Preliminary results of a road test of a vehicle of the same typology as the vehicle under study, equipped with a monitoring system equivalent to that of Figure 2, plus additional equipment for direct measurement of motor current and voltage can be seen in Figure 8. The results obtained are visible in Figure 8, indicating the existence of two variables, one being the engine speed and the power consumed or regenerated over test trip time. Thus, as an example, the test shown in Figure 8 is characterized by an initial full charged battery and the vehicle auxiliaries on, thus resulting in a 41.8% thermal engine utilization.

Comparison both approaches to obtain electric energy use, it is apparent that in both cases there are advantages and disadvantages associated with each. In the case of a direct measurement of the electrical consumption, which collects the power used and regenerated directly in the battery, it was found that an initial verification of the direct current polarity is necessary due to the way the connections are made to the battery poles. This leads to possible signal inversions which at 1Hz imply an extensive data analysis effort if no initial verification is performed. This issue is even more important

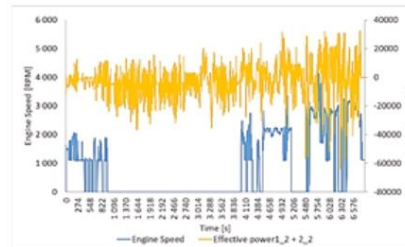


Figure 8: Graphical representation of the variables Frequency and Power versus Time in one of the tests performed on a vehicle of the same typology;

considering that there is consumption and regeneration and there may be more than one electric motor. It has yet another disadvantage inherent to the risk that occurs when making the connections, since the current and voltage magnitudes are quite high. Finally, due to the need to perform several readings, it is necessary to use dedicated equipment, which results in the existence of several files with collected data requiring alignment after the test.

Using an indirect approach based on data collected through the OBD interface, synchronized with the other dynamic data, it is also possible to obtain a good estimate of the evolution of the battery charge state and therefore, the use of electricity. However, because 100% scale of the battery is divided only in 256 bits, the accuracy is relatively low, which means that under low power conditions a long period of driving time is required before the SOC reduces by 1%. However, the method presented here allows to add some intermediate level of precision as it allows estimation at 1Hz. However, it still has the disadvantage of being an indirect analysis, which presents some difficulty in case of insufficient data, preventing the approximation of the SOC level with good accuracy. It is also interesting how the VSP was developed to predict emissions of polluting gases and in this case allows to predict the state of charge of an electric car, being a simple parameter but containing a lot of information together with other parameters.

4. Conclusions

The aim of this work was to analyze the propulsion management system of a plug-in hybrid vehicle, which had four real tests to verify the impact on the management system decision, by correctly identifying the energy use, both from internal combustion engine (Table 3) and battery SOC level (Figures 6 and 7).

Plug-in vehicles are quite versatile due to the possibility of external charging, not depending entirely on the internal combustion engine or braking regeneration to charge the battery, thus introducing an additional level of difficulty in their energy and environmental characterization under real conditions of use in accordance with vehicle certification standards in Europe. Calculated VSP and SOC information collected from the OBD interface allows for easier and safer collection, providing 1Hz estimates of SOC with proven accuracy of R^2 values around 0.99 in both tests when compared with actual charge state. Validating the SOC level over two real-world trips allow to conclude that the methods used are suitable to predict the vehicle energy management.

Moreover, the methodology used facilitates the analysis of the test data, being a more logical and less complex approach, when compared with direct methods of electrical energy measurement that endanger the testers, as well as mislead the testers responsible for data analysis.

Finally, this analysis will be expanded to other tested vehicles in order to better understand and identify driving regimes, whereby the management system chooses and compares between the different tested vehicles, seeking a broader validation of the method.

In future work it is intended to define in real time the type of propulsion system selected by the management, verify the possibility of system optimization given the external conditions, but also the influence of the auxiliaries in the decision making of the propulsion management system according to the initial SOC level of the vehicle. Moreover, it is intended to explore the possibility of optimizing the emission of pollutants, aiming to make these vehicles as "green" as possible in order to reverse the years of large-scale pollutant emission that cause climate change.

References

- [1] European Environment Agency, E. (2019). Average CO₂ emissions from newly registered motor vehicles. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles/assessment-1>.
- [2] European Environment Agency, E. (2018). GHG emissions by aggregated sector. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/ghg-emissions-by-aggregated-sector-2#tab-dashboard-01>.
- [3] Europeia, C. (5 de Novembro de 2018). Regulamento (UE) 2018/1832. Melhorar os ensaios e procedimentos de homologação no que respeita às emissões dos veículos (301/1). Jornal Oficial da União Europeia.

- [4] Varella, R.; Giechaskiel, B.; Sousa, L.; Duarte, G.: "Comparison of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) with Laboratory Grade Equipment", Applied Sciences, Volume 8, 2018, 1633 (<https://doi.org/10.3390/app8091633>).
- [5] Database, E. (2019). Electric Vehicle Database. <https://ev-database.org>
- [6] Varella, R.; Faria, M.; Mendoza-Villafuerte, P.; Baptista, P.; Sousa, L.; Duarte, G.: "Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions", Science of The Total Environment, Volume 658, 2019, 879-894 (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.053>).
- [7] Varella, R.; Duarte, G.; Baptista, P.; Sousa, L.; Mendoza Villafuerte, P.: "Analysis of the Influence of Outdoor Temperature in Vehicle Cold-Start Operation Following EU Real Driving Emission Test Procedure," SAE Int. J. Commer. Veh.10(2):596-697, 2017 (<http://dx.doi.org/10.4271/2017-24-0140>).
- [8] Jimenez-Palacios, J. L.: Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle (February de 1999). Massachusetts Institute of Technology.
- [9] Zhai, H.; Frey, H.; Roupail, N.: A Vehicle-Specific Power Approach to Speed- and Facility- Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses. Environmental Scientific Technology, 2008, Vol 42.
- [10] Frey, H.; Roupail, N.; Zhai, H.; Farias, T.; Gonçalves, G.: Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. Transportation Research Part D, 2007, Vol 12.
- [11] Khan, T.; Frey, H.: (2016). Geospatial Variation of Real-World Emissions from a Passenger Car. Air & Waste Management Association (A&WMA) 109th Annual Conference & Exhibition, At New Orleans, Louisiana.

33rd Electric Vehicle Symposium (EVS33)
Portland, Oregon, June 14 - 17, 2020

Disaggregation of PHEV energy use under different energy management strategies

M. Campino¹, N. Henriques¹, G. Duarte^{1,2,*}, C. Rolim², P. Baptista²

¹ Mechanical Engineering Department - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1 - 1959-007 Lisboa, Portugal

² IN+, Center for Innovation, Technology and Policy Research - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1 - 1049-001 Lisboa - Portugal

*goncalo.duarte@tecnico.ulisboa.pt

Summary

Plug-in hybrid vehicles are gaining more market relevance, however the complexity of its energy management and influence of user charging behavior makes it difficult to anticipate its energy and emissions impacts. This paper develops a methodology to predict the state of charge and divide the PHEV energy use under different energy management strategies, based on real world measured dynamic data, to create rules that indicate which energy source is used, individually or combined, during the charging depleting phase. Results enabled obtaining very good correlations between estimated SOC and measured SOC ($R^2 > 0.98$) and estimating correctly the energy source used in over 70% of trip points.

Keywords: PHEV, State of Charge, Energy Consumption, Propulsion, Energy Source

1 Introduction

The continuous deterioration of environmental conditions requires society to seek more environmentally friendly solutions in order to preserve the paradigm of human life. Over the last decade, international organizations have introduced new legislation which have created new challenges for the automotive industry in order to produce vehicles with lower fossil fuel consumption and consequently lower pollutant emissions. It is noted that in 2000, the emissions of CO_2 for newly sold vehicles were on average 170,2 g_{CO_2}/km , in 2018 were 120,4 g_{CO_2}/km and it is intended to achieve in Europe the goal of 95 g_{CO_2}/km by 2021 [1]. These measures come in the context of reducing the greenhouse gases responsible for climate change currently being experienced. To meet these challenges, as the conventional transport sector represents on average 10% of the total CO_2 emit globally [2], the automotive industry has been forced to design more efficient thermal engines, more sophisticated emission control systems and hybrid or fully electric vehicles. A hybrid vehicle is an interesting solution for optimizing the propulsion system and reducing emissions due to the complement of the electric motor with an internal combustion engine allowing to keep the thermal motor running at low revs, or to inhibit its operation in situations

of stable and low throttle driving. This allows a reduction in fuel consumption, a reduction in the emission of pollutants and is not exclusively dependent on electricity. With the development of the technology, different types of hybrid vehicles were introduced, differing in the management between the use of the electric motor and the internal combustion engine. Parallel hybrids use the electric motor and the internal combustion engine generate traction to move the wheels of the vehicle; in series hybrids the electric motor generates traction and the internal combustion engine is used as a backup to recharge the battery and; full hybrids, being the most common type of vehicle, characterized by the use of the electric motor and the internal combustion engine depending on an instantaneous assessment of the vehicle's condition and route or the user's preference [3].

Battery charging is also a feature that makes possible to differentiate between conventional hybrid vehicles and plug-in hybrid vehicles. Conventional hybrid vehicles only have the ability to recharge the battery from internal sources, namely thermal engine and regenerative braking, while plug-in hybrid vehicles have the ability to recharge the battery from internal sources such as conventional hybrid vehicles but also from external sources by connecting the car battery to a charging station, similarly to an electric vehicle.

As a result of the introduction of new standards for vehicle certification in Europe [4], using real-time monitoring under real driving conditions (Real Driving Emission), the quantification of energy flows (fuel and electricity both from sources outside the vehicle) in a plug-in vehicle is crucial in order to attribute the actual energy impacts and emissions associated with its use. However, although monitoring fuel consumption and emission over a road test is currently well defined in methodological terms and the equipment to be used [5], monitoring of electrical consumption implies specific care (magnitude of voltage and current involved) and the installation of specific equipment and technical care to ensure safety.

Consequently, this work explores the development of indirect techniques to estimate the electricity consumption in plug-in hybrid vehicles using information available on the OBD interface at each second of driving, under real-world conditions, as well as the identification of four major areas of operation of the propulsion system based only on dynamic data, instead of vehicle specific data. This aspect is crucial as a general method to improve the current tools and methodologies to analyze real world driving data of plug-in hybrid vehicles, by better assessing the energy and pollutant impacts of the vehicle power management.

2 Data and Methods

2.1 Data Collection

2.1.1 Vehicles

In this study, two Plug-In hybrid vehicles were tested under real driving conditions, and the main characteristics of these are shown in Table 1. Both are light passenger vehicles whose typology fits into the vehicle SUV category, in case of vehicle A, and Sedan category in case of vehicle B.

Table 1- Characteristics of the vehicles under study [6];

Vehicle	Vehicle A	Vehicle B
Displacement	1499 cc	1798 cc
Power	221 hp	121 hp
Transmission / Gearbox	Automatic- 6	Planetary Gear e-CVT
Vehicle Mass [kg]	1635	1530
Fuel	Otto	Otto
Battery [kWh]	7.6	8.8

2.1.2 Test Cycle

An RDE compliant fixed test cycle, as shown in Figure 1, was performed during the test in order to meet the necessary conditions for interpreting and evaluating the management of the integrated propulsion system

according to the state of charge of the battery. The tests were carried out in the Lisbon metropolitan area over a two-hour period (around 7200 s of data collection per trip), in which the car was initially exposed to an urban environment, then to a highway environment and, finally, again exposed to an urban environment. The tests were performed during the morning and late afternoon, in order to avoid the influence of external factors on the collected data, such as temperature peaks and excess traffic.

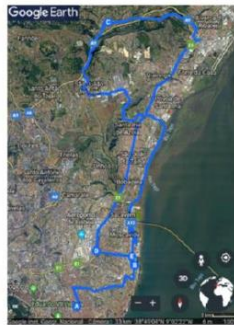


Figure1: Path performed during the tests performed [7]

2.1.3 Portable Emission Measurement System

The measurement equipment used to obtain the desired data was a portable emission measurement system (PEMS). This system provides detailed instantaneous vehicle information throughout the test and consists of an On-Board Diagnostic (OBD) reading port, a Global Positioning System (GPS) with barometric altimeter and an exhaust gas analyzer, as shown in Figure 2. The OBD interface reader allows monitoring of parameters associated with the internal combustion engine, but also the state of charge of the battery (SOC) throughout the test trip. All devices are connected to a laptop, collecting at 1Hz and synchronizing the data through LabView software in a program designed for this purpose. This way it is possible to acquire the engine data, vehicle dynamics, road topography and all the involved vehicle parameters.

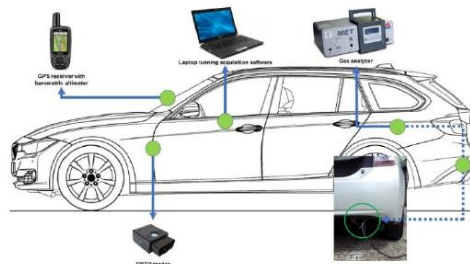


Figure 2: Major PEMS components installed in vehicles [8]

2.2 Data Analysis

2.2.1 Determination of Vehicle Specific Power

The data processing used to achieve the previously determined objectives uses the Vehicle Specific Power (VSP) methodology, calculated at each second of each test trip. This parameter is defined as a road load model and

provides an estimate of the instantaneous power on the wheel necessary to overcome vehicle to ground friction, aerodynamic resistance and increase vehicle kinetic energy and potential [9]. Although VSP is a widely used parameter for determining vehicle emissions [10, 11], supported by other parameters, it will be used in this case to estimate the battery state of charge. Therefore, this parameter can be calculated according to Equation 1.

$$\begin{aligned}
 \text{Vehicle Specific Power} &= \frac{\frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{\text{rolling}} \times v + F_{\text{aerodynamics}} \times v}{m} = \\
 &= \frac{\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \times m \times (1 + \varepsilon_i) \times v^2 + m \times g \times h \right) +}{m} \\
 &\quad \frac{C_R \times m \times g \times v + \frac{1}{2} \times \rho_a \times C_D \times A \times (v + v_w)^2 \times v}{m} = \\
 &= v \times (a \times 1 + \varepsilon_i) + g \times \text{grade} \times g \times C_R + \frac{1}{2} \times \rho_a \times \frac{C_D \times A}{m} \times (v + v_w)^2 \times v
 \end{aligned} \tag{1}$$

Where v , corresponds to vehicle speed (m/s), a corresponds to vehicle acceleration (m/s^2), ε_i corresponds to the mass factor (dimensionless), g is the gravitational constant ($9,81 \text{ m/s}^2$), grade corresponds to the relationship between altitude and distance traveled (dimensionless), C_R corresponds to the coefficient of friction between vehicle and ground (dimensionless), C_D corresponds to the drag coefficient (dimensionless), ρ_a corresponds to the outside air density (unit), A corresponds to the frontal area of the vehicle (unit), m corresponds to the mass of the vehicle (unit) and v_w corresponds to the wind speed striking the vehicle (unit). Equation 1 can be further simplified by taking into account typical vehicle coefficients and VSP is calculated according to Equation 2.

$$VSP = v \times (1.1 \times a + 9.81 \times \text{grade} + 0.132) + 0.000302 (v + v_w)^2 \times v \tag{2}$$

The calculation of the VSP value is performed every second of the trip and is typically divided into fourteen modes, or more for easier understanding, into three categories as shown in Table 2.

Table 2: Vehicle Specific Power Modes [12]

Vehicle driving	VSP mode	Definition (kW/ton)
Deceleration or downhill	1	$VSP < -2$
	2	$-2 \leq VSP < 0$
Idle	3	$0 \leq VSP < 1$
Cruising, acceleration, or uphill	4	$1 \leq VSP < 4$
	5	$4 \leq VSP < 7$
	6	$7 \leq VSP < 10$
	7	$10 \leq VSP < 13$
	8	$13 \leq VSP < 16$
	9	$16 \leq VSP < 19$
	10	$19 \leq VSP < 23$
	11	$23 \leq VSP < 28$
	12	$28 \leq VSP < 33$
	13	$33 \leq VSP < 39$
	14	$39 \leq VSP$

Using VSP modes makes possible to stratify vehicle analysis and verify vehicle behavior in different VSP modes, taking into account only parameters from vehicle dynamics. For example, the average fuel consumption in each VSP mode, with low or zero fuel consumption expected in the first three VSP modes and increasing fuel consumption in the other modes, as shown in Figure 3, in section 2.2.3.

2.2.2 Indirect method to estimate electric vehicle consumption

After the VSP data is properly analyzed and processed, a methodology to estimate the battery energy consumption was developed based on VSP. This method is based on collected battery SOC from OBD port and VSP is used as a proxy for driving dynamics and power required to wheels. Since the OBD data has low resolution (1% SOC minimum), this approach allows to analyze the battery SOC with higher precision, by obtaining a relation between the change in SOC over a specific time period in relation to the mean value of VSP in this interval. Therefore, Plug-in operation modes must be first identified. Charge depleting was set to be above 10% SOC level on Vehicle A and 15% SOC level on Vehicle B, since below this value the vehicle energy management system enters in a charge sustaining state, using mostly the internal combustion engine.

According with vehicle hybrid configuration, the analysis performed regarding change of SOC over similar VSP values required considering two conditions: when the internal combustion engine is off ($rpm = 0$) and; when the internal combustion engine is operating ($rpm \neq 0$). From this analysis, several points were obtained regarding the variation of SOC level in relation to the average VSP, allowing the development of two trend lines regarding battery consumption (using delta SOC as proxy) and VSP, according to the analysis in question.

2.2.3 Propulsion management analysis

The vehicles selected operate in a full hybrid configuration, similarly to most of the PHEV available on the market. This configuration means that the vehicle propulsion can be provided only by the electric motor, only by the internal combustion engine or both. According with the type of propulsion chosen by the vehicle power/energy management, different outcomes regarding energy use and pollutants are obtained. As a result, this paper introduces a method to estimate, for a full hybrid, a method to estimate what is the propulsion used at each second of driving based only on vehicle dynamics, dividing 1Hz trip data in four areas as shown in Table 3. This can be useful either for RDE tests and respective evaluation with European Commission driving data evaluation tools, but as an improvement to VSP methodology as a way to estimate energy from a vehicle that can opt for multiple sources.

Table 3: Definition of the existent propulsion areas on a Full Hybrid PHEV

Propulsion Type	Internal Combustion Engine OFF	Internal Combustion Engine ON
Electric motor OFF	A	B
Electric motor ON	C	D

During CD mode, the electric, electric-thermal and only thermal mode of operation is defined based solely on VSP modes, fuel consumption and engine speed through a second-by-second comparative analysis of fuel consumption at each second of driving and compared to the average consumption of VSP mode of that second, as exemplified in Figure 3. Consequently, an initial allocation of the areas identified in Table 3 was performed, based on information that can be collected at each second (vehicle speed, engine speed) and post-processed data (VSP, fuel consumption). An analysis of the real driving data suggests that points with gasoline fuel consumption over 90% Fuel Up mean (blue in Figure 3) are allocated to area B. The remaining points are allocated to D. Points without fuel consumption are allocated to C and points when the vehicle is stopped are allocated to A.

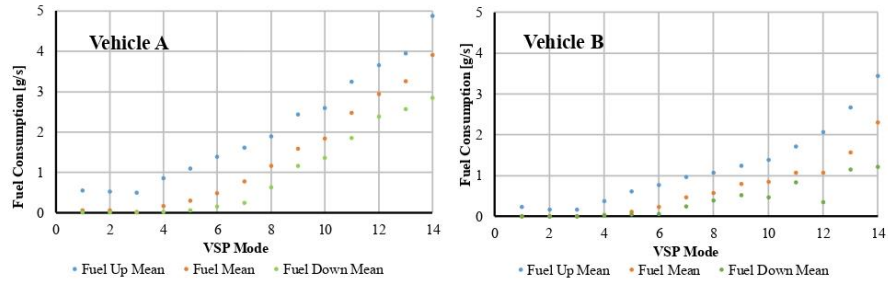


Figure 3: Relationship between fuel consumption and VSP mode.

3 Results and Discussion

3.1 Indirect method to estimate electric vehicle consumption

3.1.1 Vehicle A

Based on the 1Hz data analysis of change of SOC with VSP, it was possible to determine a relation between these two variables, both when the vehicle is operating only with electric motor and when electric motor and internal combustion engine are powering the vehicle. Figure 4 provides the relation between change of battery SOC over time and VSP (related with power), when Vehicle A is only using electric motor (Fig.4 a) and when it uses both (Fig.4 b). It should be underlined that when $\Delta\text{SOC}/\text{time}$ is positive regeneration occurs, which is consistent with negative VSP values. When the internal combustion engine is operating, battery consumption is lower (as expected) for the same VSP value. It can also be observed that there is an almost linear trend of battery consumption and VSP, underlining that the efficiency of the electric system should not change significantly with power. Moreover, there were fewer points to build the curve when the internal combustion is operating and, under these conditions, it was harder to find points on negative VSP.

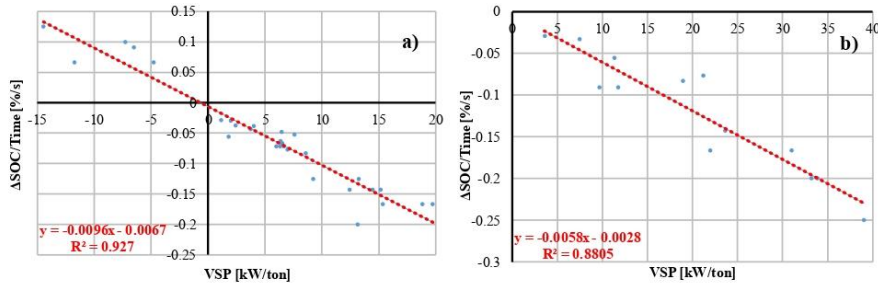


Figure 4: Trend line between the variation of the load state over time and the mean value of the VSP in this interval. a) RPM = 0; b) RPM \neq 0;

Based on the results from Figure 4 and calculated second-by-second VSP, it is possible to obtain an estimate of SOC over a trip (in CD mode) and compare it with measured data provided by OBD (see Figure 5). This approach allows having 1Hz variation of SOC with a higher resolution and estimating the power provided by the batteries.

It can be observed that the estimate generally follows the SOC measured, although there are some discrepancies in trip 2, where the vehicle used the internal combustion engine. In this case, the estimate would benefit from more points to provide a better estimate of $\Delta\text{SOC}/\text{time}$ when the internal combustion engine is working.

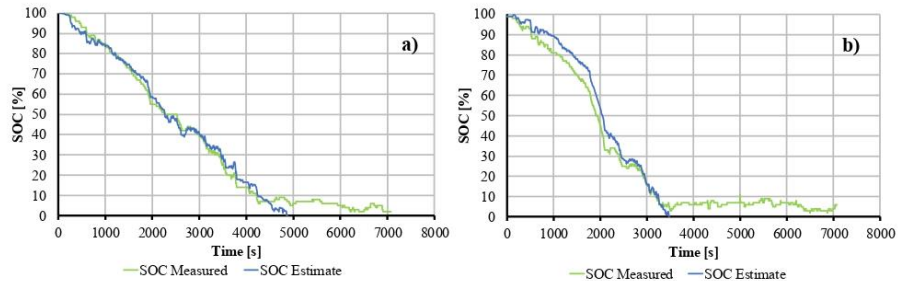


Figure 5: Approximation of charge state in tests performed with maximum battery capacity. a) Trip 1 b) Trip 2;

Figure 6 provides the correlation between estimate and measured SOC, considering the two real-world trips, indicating a good correlation ($R^2 > 0.98$), with the fitting curve slope very close to 1. These results indicate that the approach used provide a reasonable fit between estimate and collected data, under CD mode.

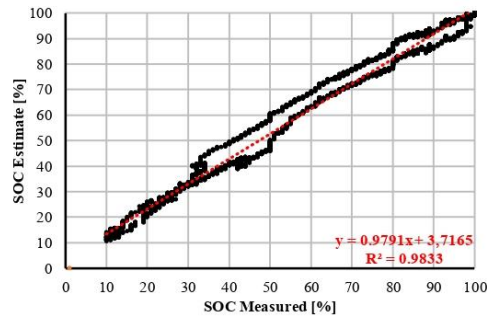


Figure 6: Comparison between actual charge state and approximate charge state in both trips;

3.1.2 Vehicle B

A similar analysis was made for Vehicle B, regarding the estimate of battery energy use with VSP. It should be underlined that Vehicle B used only electric propulsion 89% of the driving time in CD mode. Therefore, it was not possible to build a curve of $\Delta\text{SOC}/\text{time}$ when both the electric motor and internal combustion were supplying power to the wheels. Figure 7 presents the change of SOC over time with VSP, presenting a linear correlation both on positive VSP values (power supply) and negative VSP (regeneration).

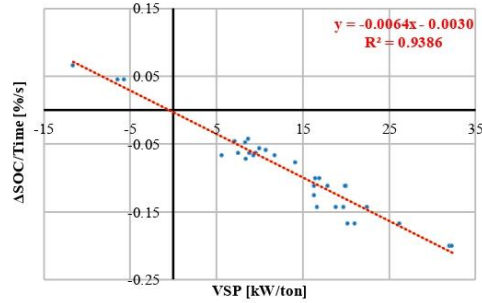


Figure 7: Trend line between the variation of the load state over time and the mean value of the VSP in this interval when RPM = 0

Figure 8 presents the application of the result from Figure 7 over the two trips, estimating at each second of driving the battery SOC, compared with measured data. It can be observed that during CD mode (circa 3500 s in both trips), the estimate is able to model and follow the battery SOC. This indicates that with this method it is possible to estimate a reasonable electricity consumption over a second-by-second basis, allowing to obtain detail information on energy use.

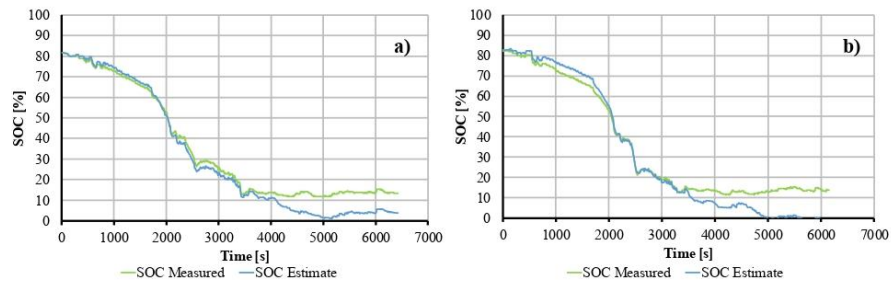


Figure 8: Approximation of charge state in tests performed with maximum battery capacity. a) Trip 1 b) Trip 2;

Figure 9 indicates that the correlation between estimated SOC and measured SOC is very accurate, with an R^2 higher than 0.99, with a slope very close to 1, suggesting a very good fit between measured and estimated SOC. The amount of points used to build the correlation presented in Figure 7 allowed to provide a very good correlation, indicating that the small of points where both the electric motor and internal combustion engine were simultaneously operating introduced a small error.

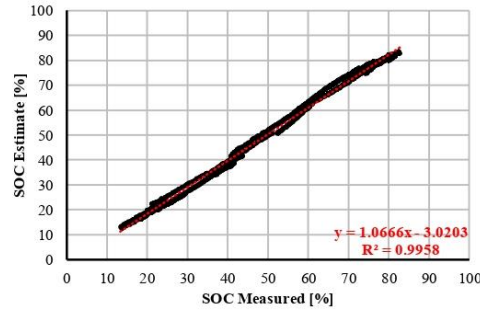


Figure 9: Comparison between actual charge state and approximate charge state in both trips;

3.2 Propulsion management analysis

3.2.1 Vehicle A

The method developed to identify the areas of operation of a Full hybrid configuration was validated with the initial allocation of areas (A to D, as presented in Table 3), based on information that can be collected at each second (vehicle speed, engine speed) and post-processed data (VSP, fuel consumption).

Table 4 presents the initial allocation of areas and the estimate of allocation of areas, based only on dynamic data. It can be observed, in case of trip 1, the predominance of area C (only electric motor), 9% on area B (ICE ON) and 12% in area D (electric motor ON and ICE ON), considering the initial allocation of areas. The estimates based only on driving dynamics provide a similar time distribution, where C is dominant, followed by D and B. In the case of trip 2, the same pattern is observed, although there is less presence of points belonging to area B and D. Again, a predominance of area C (only electric motor) is verified, followed by 10% on area D and 6% in area B. A similar trend was observed in the estimate.

Table 4: Comparison of existing and predicted points on the different areas of propulsion

Propulsion Type	Trip 1				Trip 2			
	Initial Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)	Initial Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)
A	373	373	373	100.00	347	347	347	100.00
B	406	530	200	49.26	216	525	94	43.52
C	2988	2798	2644	88.49	2517	2035	1894	75.25
D	531	597	262	49.34	318	491	133	41.82
Unallocated	-	-	819	19.06	-	-	930	27.37
Total	4298	4298	3479	80.94	3398	3398	2468	72.63

The total percentage of positive matches between allocation and estimate is circa 81% in case of trip 1, despite the few information used (only driving dynamics) and the universality of the algorithm used. Areas B and D are the most difficult to identify, since there is range of dynamic conditions where both areas overlap, reducing the percentage of correct points, resulting in unallocated points. In case of trip 2 the total percentage of positive matches between allocation and estimate is circa 73%. Once again, areas B and D are the most difficult to identify, resulting in a higher percentage of unallocated points, compared with the first trip.

3.2.2 Vehicle B

The same approach was applied on Vehicle B. In Table 6, regarding trip 1, the initial allocation shows the predominance of area C (only electric motor), with 0.7% on area B and 2% in area D. Using the generic algorithm, there was an overestimation of points on areas B and D. It should be underlined that the internal combustion engine was only operating for 92 s (areas B and D). Consequently, the percentage of correct points is globally low in these two areas due to the small sample and the difficulty to predict these areas. Nonetheless, the algorithm is able to predict correctly circa 75% of the trip 1 areas.

A similar analysis was made for trip 2. The total percentage of positive matches between allocation and estimate is circa 70%. Once again, areas B and D are the most difficult to identify, resulting in an higher percentage of unallocated points.

Table 6: Comparison of existing and predicted points on the different areas of propulsion;

Propulsion Type	Trip 1				Trip 2			
	Initial Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)	Initial Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)
A	283	283	283	100.00	270	270	270	100.00
B	26	407	3	11.54	56	444	8	14.29
C	3023	2302	2242	74.16	2896	2102	2029	70.06
D	66	406	13	19.70	76	482	15	19.74
Unallocated	-	-	857	25.22	-	-	976	29.59
Total	3398	3398	2541	74.78	3298	3298	2322	70.41

4 Conclusions

The complexity associated to PHEV energy management brings questions on what the real energy use under real world conditions is. Consequently, this paper develops a methodology capable to predict the state of charge and allocate the PHEV energy use under different energy management strategies associated to the electric and thermal motors, based on real world measured dynamic data, to create rules that indicate which energy source is used, individually or combined, during the charging depleting phase.

Two vehicles were tested using a PEMS under on-road conditions. Results enabled obtaining very good correlations between estimated SOC and measured SOC ($R^2 > 0.98$) and linear slope, close to 1. Regarding the objective of predicting the energy source (or sources) on a second-by-second basis, a generic algorithm was developed using only dynamic data (VSP, speed, acceleration) and applied to two vehicles, on two trips each. Results indicate that the algorithm can estimate correctly over 70% ($74.7\% \pm 4.5\%$) of trip points. The major difficulty was to differentiate areas B and D, where the internal combustion engine can be the sole power source or is assisted by the electric motor.

The following steps include the analysis of the importance of the 1 Hz information on the propulsion areas to allocate the correspondent fuel use and emissions. This could be of major importance for the VSP methodology, where energy use and pollutant outcomes are only based on the VSP values provided only by a driving schedule, without information on the propulsion system used. Moreover, regarding the current RDE driving data analysis tools used by the European Commission, there is also no information on which propulsion system is used on a PHEV. Particularly for EMROAD [13, 14], this type of information can be useful to build and validate the windows used on the analysis of RDE tests.

Acknowledgments

The authors acknowledge Fundação para a Ciência e Tecnologia for IN+ Strategic Project UID/EEA/50009/2019 and for contract CEECIND/02589/2017. This work is supported by European Union's Horizon 2020 research and innovation program under Grant Agreement No. 691895 SHAR-LLM ("Sharing Cities").

References

- [1] European Environment Agency, E. (2019). Average CO2 emissions from newly registered motor vehicles. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles/assessment-1>.
- [2] European Environment Agency, E. (2018). GHG emissions by aggregated sector. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/ghg-emissions-by-aggregated-sector-2#tab-dashboard-01>.
- [3] O. D. Momoh and M. O. Omoigui, "An overview of hybrid electric vehicle technology," 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, 2009, pp. 1286-1292. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289703
- [4] Europeia, C. (5 de Novembro de 2018). Regulamento (UE) 2018/1832. Melhorar os ensaios e procedimentos de homologação no que respeita às emissões dos veículos (301/1). Jornal Oficial da União Europeia.
- [5] Varella, R.; Giechaskiel, B.; Sousa, L.; Duarte, G.: "Comparison of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) with Laboratory Grade Equipment", Applied Sciences, Volume 8, 2018, 1633 (<https://doi.org/10.3390/app8091633>).
- [6] Database, E. (2019). Electric Vehicle Database. <https://ev-database.org>
- [7] Varella, R.; Faria, M.; Mendoza-Villafuerte, P.; Baptista, P.; Sousa, L.; Duarte, G.: "Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO2 and NOx emissions", Science of The Total Environment, Volume 658, 2019, 879-894 (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.053>).
- [8] Varella, R.; Duarte, G.; Baptista, P.; Sousa, L.; Mendoza Villafuerte, P.: "Analysis of the Influence of Outdoor Temperature in Vehicle Cold-Start Operation Following EU Real Driving Emission Test Procedure," SAE Int. J. Commer. Veh. 10(2):596-697, 2017 (<http://dx.doi.org/10.4271/2017-24-0140>). [Authors](#)
- [9] Jimenez-Palacios, J. L.: Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle (February de 1999). Massachusetts Institute of Technology.
- [10] Zhai, H.; Frey, H.; Roupail, N.: A Vehicle-Specific Power Approach to Speed- and Facility-Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses. Environmental Scientific Technology, 2008, Vol 42.
- [11] Frey, H.; Roupail, N.; Zhai, H.; Farias, T.; Gonçalves, G.: Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. Transportation Research Part D, 2007, Vol 12.
- [12] Khan, T.; Frey, H.: (2016). Geospatial Variation of Real-World Emissions from a Passenger Car. Air & Waste Management Association (A&WMA) 109th Annual Conference & Exhibition, At New Orleans, Louisiana.
- [13] European Commission, "Commission Regulation (EU) 2016/427 of 10 March 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)", Official Journal of the European Union, 2016.
- [14] JRC, "EMROAD – Users Guide – Version 5.90," European Commission, 2015.

Authors



Gonçalo Duarte received the Ph.D. in Mechanical Engineering (2013) from Instituto Superior Técnico, Portugal. He is currently Lecturer at Instituto Superior de Engenharia de Lisboa and Assistant Researcher at IN+ Center for Innovation, Technology and Policy Research. His main research topics address the real-world, on-road energy and environmental impacts of vehicle propulsion technologies, with particular focus on current and future vehicle certification standards and proceedings.



Miguel Campino received the Degree in Mechanical Engineering (2018) from Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. He is currently attending master's degree at Instituto Superior de Engenharia de Lisboa and working as a Energy and Systems Control section monitor at Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.



Nuno Henriques received the Master of Electrical & Computer Engineering degree (1991) from Instituto Superior Técnico. For twenty years held management positions in various companies in the areas of electricity and HVAC. He is currently Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering at Instituto Superior de Engenharia de Lisboa and is attending the Ph.D degree in Electrical Engineering at Universidade da Beira interior. His main research interests focus on energy efficiency in buildings and electrical traction applied to road and rail systems.



Catarina Rolim received the Ph.D. in Sustainable Energy Systems (2016) from Instituto Superior Técnico, Portugal. She is currently a Post-doc researcher at IN+ Center for Innovation, Technology and Policy Research. Her main research topics are smart and sustainable cities, citizen engagement in the design and implementation of new services and technologies, willingness to adopt new solutions and, behaviour change and its consequent energy and environmental impacts.



Patrícia Baptista received the Ph.D. in Sustainable Energy Systems (2011) from Instituto Superior Técnico, Portugal. She is currently an Assistant Researcher at IN+ Center for Innovation, Technology and Policy Research. Her main research topics have been on the quantification of energy and environmental impacts of alternative transport options, on how to influence user behavior by using ICT to characterize driving behavior and policy design for more sustainable transports.

**Development of indirect method for the performance assessment of a
Plug-in Hybrid Electric Vehicle propulsion management system**

M. Campino^a, N. Henriques^a, P. Baptista^b, R. Varella^c, G. O. Duarte^{a,b,*}

^a *Mechanical Engineering Department - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Rua Conselheiro
Emídio Navarro, 1 - 1959-007 Lisboa, Portugal*

^b *IN+, Center for Innovation, Technology and Policy Research - Instituto Superior Técnico, Universidade de
Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1 - 1049-001 Lisboa - Portugal*

^c *AVL MTC Motortestcenter AB, Armaturvägen 1, 13623 Haninge, Sweden*

*Corresponding Author: goncalo.duarte@isel.pt, Tel: +351964294429, ADEM, Instituto Superior de
Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

Submitted to:
Journal of Power Sources

December 2020

ABSTRACT

Plug-in hybrid vehicles energy management complexity and influence of user charging behaviour makes it difficult to anticipate its energy and emissions impacts and current methodologies do not take into consideration the propulsion management. This paper presents a methodology (ABCD Method) based only on dynamic data to assess the battery state of charge, identifying second by second which propulsion source is working and estimates the correspondent energy consumption, pollutant gas emissions and utility factor. Results enabled obtaining good correlations between estimated SOC and measured SOC ($R^2 > 0.99$). The ABCD Method uses a generic algorithm to allocate points of different propulsion combinations, being able to correctly identify the energy source used in over 82.2% of trip points. The ABCD method and VSP standard method were compared with data for four trips tested in 2 PHEV vehicles, indicating that ABCD method presents better estimates for electric energy use ($35.3\% \pm 10.4\%$ vs $41.3\% \pm 16.5\%$, compared with standard VSP) and NO_x emissions ($42.0\% \pm 32.8\%$ vs $49.8\% \pm 49.4\%$). Although presenting comparable deviations, it was found that the ABCD Method would allow to estimate total energy use with a deviation below 1.5% if an exact allocation of the energy source was possible.

Keywords: PHEV, State of Charge, Energy Consumption, Propulsion, Energy Source

1 INTRODUCTION

The modification of environmental conditions has become a global concern, requiring the search for green technology solutions, in order to preserve the quality of life and reduce the carbon footprint. Since the transport sector is responsible for around one third of Europe's final energy consumption and one fourth of CO_{2eq} (includes different greenhouse gases, considering the equivalent global warming impact) emissions [1] new regulations have been introduced, making the automotive industry to produce vehicles more efficient and lower polluting vehicles. These EU regulations have become stricter over the years, having resulted in going from an average emission of CO_2 for newly sold vehicles of 170.2 g/km of CO_2 in 2000 that decreased to 120.4 g/km of CO_2 in 2018. The current target sets the goal of 95 g/km of CO_2 by 2021 for new vehicles sold in the EU [2].

In order to comply with these regulations, the automotive industry has been forced to design more efficient internal combustion engines, more sophisticated emission control systems, and to introduce the mild to full electrification of vehicles. This has resulted in alternative vehicle technologies entering the market (e.g. hybrid and fully electric vehicles).

If fully electric vehicles (EVs) have been targeted mainly for city use due to its range limitation, the existence of the secondary power source has enabled hybrids to attract interest for longer trips and driver not prone to fully shift their refueling/recharging habits [3].

In more detail, a hybrid vehicle is a solution for improving the propulsion system's energy management and reducing emissions using a combination of the electric motor and an internal combustion engine (ICE). This vehicle technology allows the thermal motor to

operate in areas of higher efficiency or to inhibit its operation during the electric motor functioning. With the growth of this technology, different types of hybrid vehicles have been introduced. These types of vehicles can be distinguished by the way the two propulsion sources interact (thermal and electric) with each other [4] or in the way the vehicle's battery is recharged [5].

Focusing on how the battery is charged, vehicles can be classified as hybrid (HEV) or Plug-in hybrid (PHEV). Hybrid vehicles only have the ability to recharge the battery from internal sources, namely the thermal engine and regenerative braking. Plug-in hybrids can recharge the battery from internal sources similarly to HEVs but can also use an external sources by connecting the car battery to a recharging station, similarly to an electric vehicle [3]. PHEV and HEV are also called as Off-Vehicle Charging hybrid electric vehicle (OVC-HEV) and Not off-vehicle charging hybrid electric vehicle (NOVC-PHEV), respectively, according to the latest EU regulation [6].

The quantification of energy use (either fuel or electricity) in a PHEV is crucial in order to allocate the real energy impacts and emissions associated with its use. However, this is a very complex process, particularly under real driving conditions. This is particularly relevant due to the fact that the new standards for vehicle certification in Europe will take into account Real Driving Emission (RDE) tests [6]. Although monitoring fuel consumption and emissions over a road test is currently well defined in methodological terms and in terms of the equipment to be used [7], monitoring of electric energy consumption implies specific know-how and equipment (due to magnitude of voltage and current involved) and the installation of dedicated equipment with technical care requirements to ensure safety.

Moreover, PHEV may present different strategies to manage each of the power sources, leading to different outcomes in energy used and pollutants emitted under on-road

conditions [8]. In order to address this problem, several complementary methodologies have been developed with the ability of estimating the electric energy consumption of a PHEV and predict the operation of a PHEV propulsion management system, for example methodologies based on Rules [9], Fuzzy Logic [10], Optimization Theory (Dynamic Programming) [11,12], Pontryagin's Minimum Principle (PMP) [13–15], Strategies focused on Minimum Equivalent Consumption (ECMS) [16], Machine Learning [17] and on Neural Networks [18].

Despite this wide variety of approaches, these methodologies are complex and quite limited allowing its application only to a specific car tested under certain conditions. For example, the rule-based methodologies, despite being "generic", do not make an assertive analysis of the operation of the PHEV, imposing a form of regulated operation taking into account the necessary power and the available electric distance, focusing essentially on prioritizing one of the propulsion sources and, in extreme cases, does trigger the other source of propulsion [9]. The methodologies based on fuzzy logic present some complexity in the development of the method, more precisely in creating the rules based on the components efficiency maps, which are afferent only to the vehicle under study [10]. Methods based on dynamic programming are applied in a restricted way, being dependent on the development of a dynamic programming model that can only be applied to a certain type of driving cycle [11]. The application of methods based on PMP, have benefits since they are computationally efficient although only suitable for certain driving cycles and already predetermined [13–15]. The ECMS-based methods demonstrate a very restricted application due to the high sensitivity of the Equivalent Factor, which makes this method only applicable to certain predetermined driving cycles [16]. Finally, methods based on machine learning or neural networks, besides demonstrating several limitations associated with computing time, are also very limited if the input conditions are not as

expected, which may lead to results that are impossible to reproduce, making their application only possible for predetermined driving cycles [17,18].

In this sense, both for on-road vehicle monitoring under certification conditions and for providing energy use estimates and pollutants emitted using real-world data, there is the need to develop a comprehensive simple approach that provides information on the PHEV propulsion sources state of operation, at any time, based only on driving data. This aspect is increasingly important considering that the propulsion management is also dependent of the driving cycle characteristics (speed, acceleration, road grade, driving context, etc). Therefore, two perspectives can be considered: the impacts of battery SOC and driving cycle in propulsion management in RDE tests; and for a numerical test of the impacts of PHEV on any driving cycle, it is required to assess the battery SOC and propulsion management over the driving cycle [6].

Consequently, this work explores the development of simple and generic indirect approach to estimate the fuel and electric energy consumption in PHEVs using information available on the OBD interface at each second of driving, under real-world conditions, as well as the identification of four major areas of operation of the two power sources based only on dynamic data. This last aspect is crucial since using easily available variables enables a more generic and simpler method to assessing energy consumption and pollutant emissions resulting of the PHEV power management in real world driving conditions.

2 METHODOLOGY

The methodology of this work (Presented in Figure 1) is essentially made up of two stages. First, a data collection phase, in which data was collected using a Portable Emission Measurement System (PEMS) device in two PHEV in a specific Test Trip. That

was followed by a data analysis phase, in which Vehicle Specific Power (VSP) was calculated.

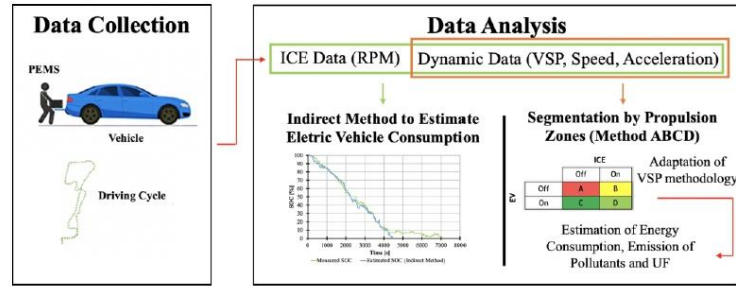


Figure 1 – Schematic representation of the applied methodology

Based on VSP and on-road driving data parameters, an indirect method was developed to estimate the electric energy consumption of a PHEV and a generic algorithm was created to segment the propulsion zones based only on vehicle dynamics, as presented in Table 1. Finally, the algorithm was used to estimate energy consumption, pollutant emission and the utility factor.

Table 1- Summary of information obtained from the methodologies introduced on sections 2.2.2 and 2.2.3 compared with Standard Vehicle Specific Power (VSP) methodology;

Section	Standard VSP Method	ABCD Method
2.2.2 – Indirect method to estimate electric energy consumption	Battery SOC over Charge Depleting	Battery SOC over Charge Depleting
	Battery SOC over Charge Sustaining	----
2.2.3 - Segmentation by propulsion zones (ABCD Method)	----	Information on Propulsion (energy/power source)

2.1 Data Collection

2.1.1 Vehicles

In this study, two PHEVs were tested under real driving conditions, corresponding to light-duty passenger vehicles, within the SUV category for vehicle A and the Sedan category for vehicle B. The main characteristics of these vehicles are shown in Table 2.

Table 2- Characteristics of the vehicles under study [19];

Vehicle	Vehicle A	Vehicle B
Displacement	1.5 l	1.8 l
Power	221 hp	121 hp
Transmission	Automatic	Automatic
Vehicle Mass	1.6 ton	1.5 ton
Fuel	Otto	Otto
Battery/ Electric Range	7.6 kWh/ 40 km	8.8 kWh/ 40 km

2.1.2 Test Cycle

An RDE compliant fixed test cycle was performed in the metropolitan area of Lisbon, meeting all RDE boundary conditions [6] (see Figure 2), in order to evaluate the management of the integrated propulsion system according to the state of charge of the battery. Two tests were composed of three stages to guarantee a mixed driving cycle: it initially covered an urban section; followed by an motorway and rural section. The tests were carried out for over a period of about two hours (about 7200 s of data per trip), during the morning or at the end of the afternoon in order to avoid the influence of external factors on the collected data, such as temperature spikes or excessive traffic.

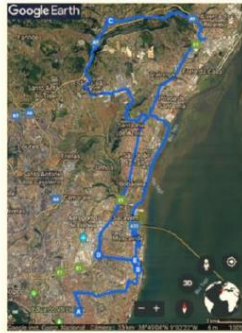


Figure 2: Test cycle performed during the tests performed [20]

2.1.3 *Portable Emission Measurement System*

A PEMS was used to obtain the desired data. This system provides detailed instantaneous vehicle information throughout the test and consists of an On-Board Diagnostic (OBD) reading port, a Global Positioning System (GPS) with barometric altimeter and an exhaust gas analyzer, as shown in Figure 3. The OBD interface reader allows monitoring parameters associated with the ICE, but also the state of charge of the battery (SOC) throughout the test trip. All devices are connected to a laptop, collecting at 1 Hz and synchronizing the data through a data acquisition software in a program designed for this purpose. This way it is possible to acquire the engine data, vehicle dynamics, road topography and all the involved vehicle parameters, except the parameters associated with the electricity flow.

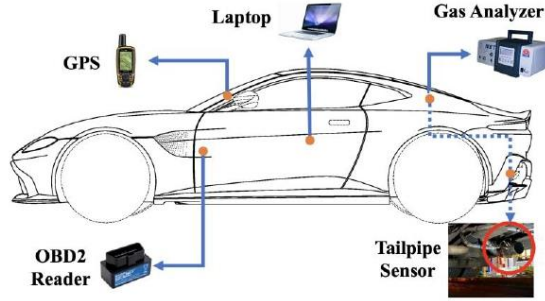


Figure 3: Major PEMS components installed in vehicles

2.2 Data Analysis

2.2.1 Determination of Vehicle Specific Power

The methodology used to process on road data was the Vehicle Specific Power (VSP) methodology, which is applied to each second of driving. This data treatment approach is defined as a road load model and provides an estimate of the instantaneous power on the wheel necessary for the vehicle to overcome ground friction, aerodynamic resistance and increase vehicle kinetic and potential energy [21]. VSP is calculated according to Equation 1.

$$\begin{aligned}
 \text{Vehicle Specific Power} &= \frac{\frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{\text{rolling}} \times v + F_{\text{aerodynamics}} \times v}{m} = \\
 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \times m \times (1 + \varepsilon_i) \times v^2 + m \times g \times h \right) + \frac{C_R \times m \times g \times v + \frac{1}{2} \times \rho_a \times C_D \times A \times (v + v_w)^2 \times v}{m} \quad (1) \\
 &= v \times (a \times 1 + \varepsilon_i) + g \times \text{grade} \times g \times C_R + \frac{1}{2} \times \rho_a \times \frac{C_D \times A}{m} \times (v + v_w)^2 \times v
 \end{aligned}$$

Where v corresponds to vehicle speed (m/s), a corresponds to vehicle acceleration (m/s^2), ε_i corresponds to the mass factor (dimensionless), g is the gravitational constant ($9,81 \text{ m/s}^2$), grade corresponds to the relationship between altitude and distance traveled

(dimensionless), C_R corresponds to the coefficient of friction between vehicle and ground (dimensionless), C_D corresponds to the drag coefficient (dimensionless), ρ_a corresponds to the outside air density (kg/m^3), A corresponds to the frontal area of the vehicle (m^2), m corresponds to the mass of the vehicle (kg) and v_w corresponds to the wind speed striking the vehicle (m/s). Equation 1 can also be simplified by applying the typical values of the coefficients ($C_R = 0.00135$, $\rho_a = 1.207 kg/m^3$ at $20^\circ C$ and $\frac{C_D \times A}{m} = 0.0005 m^2/kg$) [21] thus allowing to facilitate the calculation of the VSP, as seen in Equation 2.

$$VSP = v \times (1.1 \times a + 9.81 \times grade + 0.132) + 0.000302 (v + v_w)^2 \times v \quad (2)$$

The calculation of the VSP value is performed every second of the trip and is typically divided into fourteen mode bins. Using VSP modes allows to analyze vehicle behavior in different bins, by assessing power taking into account only parameters from vehicle dynamics, enabling the comparison between vehicles and between propulsion technologies [22,23].

Although VSP is a widely used parameter for estimating vehicle's energy consumption and emissions [22,23], in this case it will be used to estimate the battery state of charge (SOC).

2.2.2 Indirect method to estimate electric energy consumption

A methodology to estimate the battery energy consumption was developed based on collected battery SOC from OBD port and VSP. Since the OBD data has low resolution (1/256 bits), this approach allows to analyze the battery SOC with higher precision without direct measurement, by obtaining a relation between the change in SOC over a specific time period in comparison to the mean value of VSP in this interval.

Therefore, energy flow operation modes must be firstly identified. The charge depleting (CD) mode was set to be above 10% SOC on Vehicle A and 15% SOC on Vehicle B, since

below this value the vehicle energy management system enters into a charge sustaining (CS) mode, with predominant use of the ICE. The analysis on the change of SOC over similar VSP values require considering two conditions: 1) ICE is off ($\text{rpm} = 0$); and ICE is operating ($\text{rpm} \neq 0$). This analysis generated several points regarding the variation of SOC level in relation to the average VSP, allowing the development of two trend lines according to the operation of the ICE.

Based on the two trend lines (one for $\text{rpm}=0$ and other for $\text{rpm} \neq 0$), the electric energy consumption curve was modeled according to the type of propulsion used. The vehicles selected operate in a full hybrid configuration, similarly to most of the PHEV available on the market. This configuration means that the vehicle propulsion can be provided only by the electric motor, only by the ICE or both. Based on this fact, the vehicle propulsion was defined at each second of the trip by comparing the fuel consumption in each instant and the weighted average of fuel per VSP mode of both trips.

Taking this comparison into account, it was possible to estimate whether the vehicle only drives based on the ICE. In this situation the fuel consumption at each instant is higher than the weighted average, thus the SOC variations is null. When only the electric motor is used, fuel consumption is zero and the SOC variation is characterized by the trend line associated to $\text{rpm} = 0$. Finally, when both motors (electric and ICE) are operating, it estimates that the instant fuel consumption is lower than the weighted average, so the SOC variation is characterized by the trend line ($\text{rpm} \neq 0$). The diagram shown in Figure 4 summarizes the methodological procedure described.

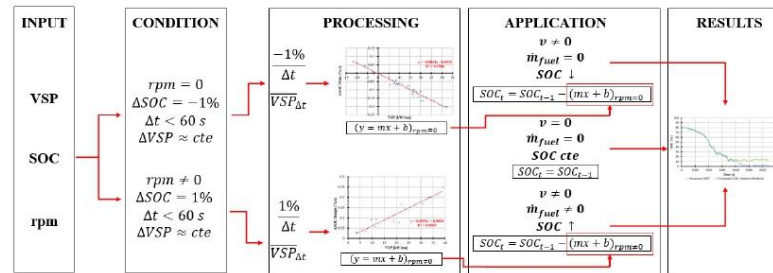


Figure 4- Illustration of the methodological procedure of the indirect method

2.2.3 Segmentation by propulsion zones (ABCD Method)

According with the type of propulsion chosen by the vehicle power/energy management, different outcomes regarding energy use and pollutants are obtained. As a result, this paper introduces an innovative method to estimate, for a full hybrid plug-in, what is the type of propulsion used at each second of driving based only on vehicle dynamics, named as ABCD Method, dividing 1 Hz trip data in four areas as shown in Table 3.

Table 3: Definition of propulsion areas on a Full Hybrid PHEV

Propulsion Type	Internal Combustion Engine OFF	Internal Combustion Engine ON
Electric motor OFF	A	B
Electric motor ON	C	D

To develop the ABCD Method, an initial allocation of the areas identified in Table 3 was performed, based on information that is collected in each second (vehicle speed, engine speed, fuel consumption). Following the same logic that was used in the indirect method to estimate electric energy consumption, an analysis of the real driving data suggests that, based on the analyzed/performed two trips, points with gasoline fuel consumption under the average and during CD condition are allocated to area D. The remaining points are allocated to B. Points without fuel consumption are allocated to C and points when the vehicle is stopped are allocated to A.

An algorithm was developed to characterize each propulsion area, regarding conditioning intervals, composed by dynamic properties collected during both vehicle's trips (Speed, VSP, Acceleration). Considering the initially made allocation, each interval is adjusted, so that the estimate is as accurate as possible when compared to the initial estimate. Figure 5 shows an example how allocation procedure is done according to the developed method.

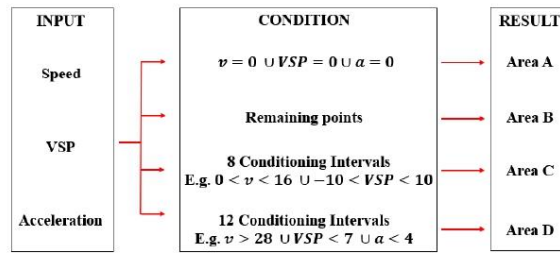


Figure 5- Example of how the ABCD Method works according to dynamic properties

In order to validate the ABCD Method, fuel consumption and pollutant emissions are estimated, so it is possible to compare with the real consumption and emissions, as well as with the consumption and emissions calculated using the Standard VSP Method. The calculation of fuel consumption and pollutant emissions can be described by the following equations (Eq. 3 to 5) depending on each method analyzed. More specifically, Equation 3 refers to the calculation of fuel consumption and pollutant emissions taking into account the ABCD Method, Equation 4 concerns the Standard VSP Method and Equation 5 corresponds to 1 Hz trip data.

$$x = \left(\sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CD} \right)_B + \left(\sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CD} \right)_D \quad (3)$$

$$x = \left(\sum_{i=1}^{14} \bar{x}_i \times \%t_i \times t_{CD} \right) \quad (4)$$

$$x = \sum_{i=1}^{t_{CD}} x_i \quad (5)$$

Regarding equations 3 and 4, the calculation considers all the VSP modes, whereupon the variable \bar{x} represents the average fuel consumption or the average emissions of a pollutant such as CO_2 , CO, NO_x , HC (g/s), the variable % t represents the percentage of time in each mode and the variable t_{CD} represents the total time in CD mode for each trip. It should be noted that in the case of equation 3, the average considered is relative to each allocation area, B or D, and takes into account the two trips made, while equation 4 takes into account only the total average of the two trips made. In the case of equation 5, the calculation is summed up over time, whereupon variable x represents the total fuel consumption or the total emissions of a polluting gas such as CO_2 , CO, NO_x , HC (g).

Electric energy consumption was based on the indirect method to estimate energy consumption, described in subchapter 2.2.2. As previously described, the indirect method to estimate electric energy consumption depends essentially on the operation of the ICE. Through the developed method, when characterizing the propulsion modes in each instant, the operation of the ICE is known, allowing to allocate each trend line resulting in the consumption estimate of electricity. On the other hand, based on the standard VSP methodology, being unable to distinguish the propulsion modes, the estimate of electric energy consumption is made through a general approach and the result of combining all the points previously obtained to create a global trend line that allows the calculation of electric energy consumption.

The laboratory certification procedure for PHEV includes determining its utility factor (UF), which corresponds to the proportion of the distance the vehicle covers in full electric mode. Purely electric vehicles are characterized by a UF of one, while purely ICE vehicles are characterized by a UF of zero. In the case of PHEV, the UF varies according to the distance traveled in electric mode. Under RDE testing, where different driving cycles are used to evaluate real-world energy use and pollutant outcomes, analyzing

energy management is complex, therefore, this paper also addresses the impact of the driving cycle on UF, based on the methodologies developed within this work to determine battery energy use, as well as electricity/fuel management.

Although the UF concept was introduced in the SAE 2841 standard [24], it is in the SAE 1711 standard that the driving cycle validation criteria's are described, with the details on the calculation of the UF [25]. The first criterion states that the SOC variation during the CS mode must be less than 2% of the SOC variation over the entire driving cycle, as described in Equation 6 [25]. The second criterion focuses on the energy spent during the CS mode, which must be less than 1% of the energy generated by the total mass of fuel consumed during the entire drive cycle. Although there is no direct knowledge of the quantities related to the calculation of criterion two (voltage and current), knowing that the product of the voltage by the current is equal to the power, it is possible to perform the calculation, as described in Equation 7 [25].

$$|\Delta SOC| = \left| \frac{\Delta SOC_{CS}}{\Delta SOC_{CD} + \Delta SOC_{CS}} \times 100 \right| < 2\% \text{ Total SOC} \quad (6)$$

$$|NEC| = \frac{\text{Net Energy Change}}{\text{Total Fuel Energy}} = \frac{((A.h)_{final} - (A.h)_{initial}) \times V_{\text{systema}}}{PCI \times m_{\text{fuel}}} = \frac{SOC_{final} - SOC_{initial} \times 3.6 \times 10^6}{PCI \times m_{\text{fuel}}} = < 1\% \text{ of Fuel Energy} \quad (7)$$

Having performed both validation criteria, requiring approval only in one, the UF calculation can be described as the quotient of the distance traveled by the vehicle during the CD mode and the total distance traveled by the vehicle. This relationship is described in Equation 8 [25].

$$UF(R_{CD}) = \frac{\min(d, R_{CD})}{d_{total}} = \frac{d_{CD}}{d_{total}} \quad (8)$$

3 RESULTS AND DISCUSSION

This chapter presents the results obtained, referring to the estimate of electric energy consumption using the indirect method and the differentiation by zones based on the ABCD Method and the impacts on the level of consumption, emissions and utility factor.

3.1 Indirect method to estimate electric vehicle consumption

Based on the 1Hz data analysis of SOC and VSP, it was possible to provide the relation between the change of battery SOC over time and VSP depending on the operating state of the ICE and of the electric motor to both vehicles, as shown in Figure 6.

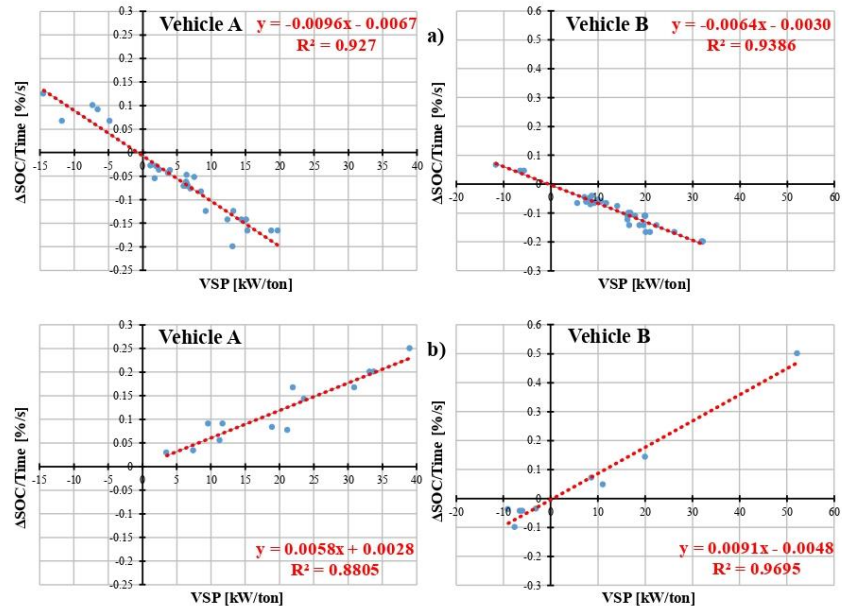


Figure 6: Trend line between the ΔSOC over time and the average VSP: a) RPM = 0; b) RPM \neq 0).

It should be underlined that, when $\Delta SOC/time$ is positive, regeneration occurs, which is consistent with negative VSP values. As expected, when the ICE is operating, battery consumption is lower for the same VSP value. In both cases, can also be observed that there is an almost linear trend of battery consumption and VSP, confirming that the

electric system efficiency should not change significantly with power [26]. Moreover, there were a smaller sample of points to build the curve when the ICE is operating, making it more difficult to find points on negative VSP.

Based on the results from Figure 6 and on the calculated second-by-second VSP, it was possible to obtain an estimate of SOC over a trip (in CD mode) and compare it with measured data provided by the OBD (see Figure 7).

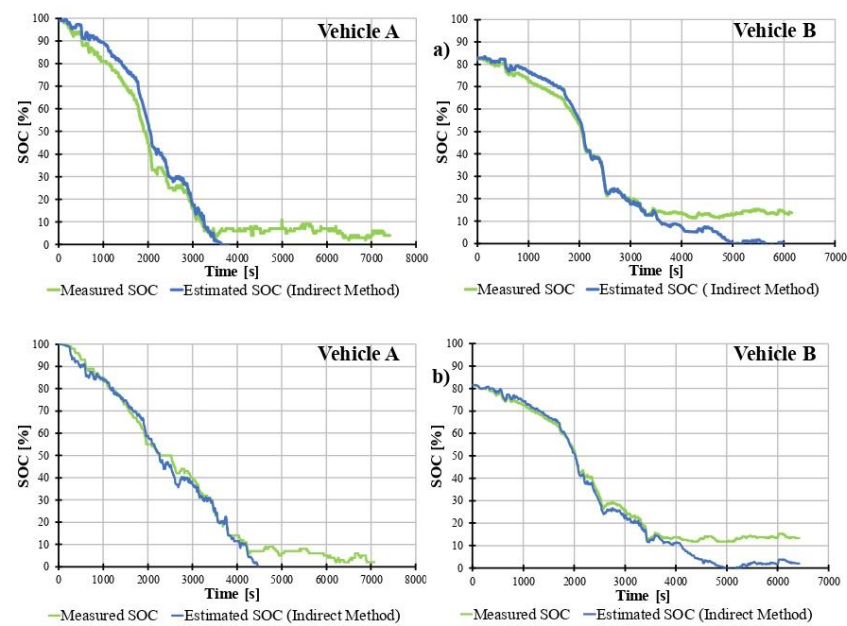


Figure 7: Measured versus estimated SOC in the tests performed with maximum battery capacity: a) Trip#1; b) Trip#2.

This approach allows having a 1Hz variation of SOC with a higher resolution and estimating the power provided by the batteries. It can be observed that the estimate generally follows the SOC measured, although there are some discrepancies in Trip#2, where the vehicle used the ICE. In this case, the estimate would benefit from more points to provide a better estimate of Δ SOC/time when the ICE is working.

Figure 8 provides the correlation between estimate and measured SOC, considering the two real-world trips. For the case of vehicle A, there is a good correlation ($R^2 > 0.98$), with the fitting curve slope very close to 1. For the case of Vehicle B the correlation between estimated SOC and measured SOC is very accurate, with an R^2 higher than 0.99, with a slope very close to 1, suggesting a very good fit between measured and estimated SOC. These results indicate that the approach used provide a reasonable fit between the estimated and the collected data, under CD mode.

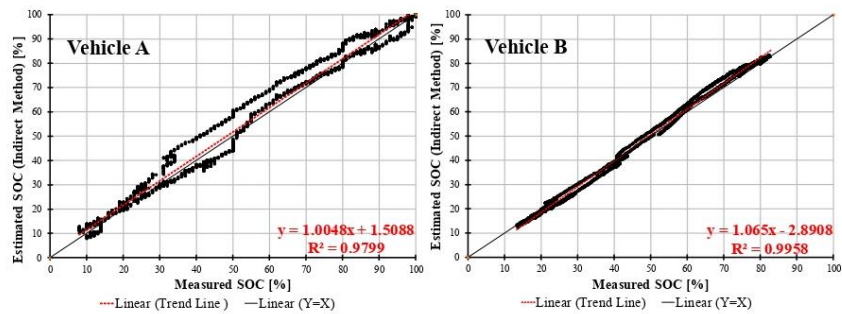


Figure 8: Comparison between actual charge state and approximate charge state in both trips

3.2 Impacts on consumption and emissions of segmentation by propulsion zones

3.2.1 Vehicle A

The developed method to identify the areas of operation of a full hybrid PHEV configuration was validated with the initial allocation of areas (A to D, as presented in Table 3), based on information that can be collected at each second (vehicle speed, engine speed) and post-processed data (VSP, fuel consumption). Table 4 presents the real allocation of areas and the estimate of allocation of areas, based only on dynamic data.

Table 4: Comparison of existing and predicted points on the different areas of propulsion

Propulsion Type	Trip#1				Trip#2			
	Real Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)	Real Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)
A	392	392	392	100.00	373	373	373	100.00
B	765	647	383	50.07	399	338	150	37.59
C	2970	2800	2572	86.60	2490	2340	2195	88.15
D	171	459	80	46.78	135	346	72	53.33
Unallocated	-	-	871	20.27	-	-	607	17.87
Total	4298	4298	3427	79.73	3397	3397	2790	82.13

It can be observed that, for Trip#1, the real allocation demonstrates predominance of area C (only electric motor), 18% on area B (ICE ON) and 4% in area D (electric motor ON and ICE ON). The estimates based only on driving dynamics provide a similar time distribution, where C is dominant, followed by B and D. For Trip#2, the same pattern is observed, although there is less points belonging to area B. Again, a predominance of area C (only electric motor) is verified, followed by 12% on area B and 4% in area D. A similar trend was observed in the estimate.

The total percentage of positive matches between allocation and estimate is circa 80% for Trip#1, despite the few information used (only driving dynamics) and the universality of the algorithm used. Areas B and D are the most difficult to identify, since there is a range of dynamic conditions where both areas overlap, reducing the percentage of correct points, resulting in unallocated points. For Trip#2 the total percentage of positive matches between allocation and estimate is circa 82%. Once again, areas B and D are the most difficult to identify, resulting in a higher percentage of unallocated points, compared with the first trip. Unallocated points result from overlapping intervals, in which there are two modes of propulsion with the same dynamic properties at different times. In order to overcome this situation, the intervals were adjusted in order to benefit the hit although

there are still points where the hit is not correct, being allocated in the propulsion mode that has the dynamic range that limits it.

Although there is no fully correct allocation, it is possible to estimate energy consumption (fuel and electricity) and emissions of polluting gases based on the specific calculation for each propulsion area. Table 5 and Table 6 show the results obtained, as well as their relative and absolute errors when compared to reality. The ABCD method was also tested assuming 100% correct allocation, in order to assess the importance of introducing the energy management on the estimates.

Table 5: Energy consumption (Fuel and Electricity) and associated absolute (e_a) and relative error (e_r)

		Fuel				Electricity			
		<i>mass</i> [g]	<i>l/100</i> km	e_r [%]	e_a [g]	<i>energy</i> [kWh]	<i>kWh/100</i> km	e_r [%]	e_a [g]
Trip#1	Measured	1428.60	3.45	-	-	7.26	12.64	-	-
	ABCD Method (79.73% correct allocation)	1237.30	2.99	13.39	191.30	5.44	9.48	25.05	1.82
	ABCD Method (100% correct allocation)	1427.18	3.45	0.10	1.42	7.26	12.64	0.00	0.00
	Standard VSP Method	1280.36	3.10	10.38	148.24	11.73	20.42	61.49	4.47
Trip#2	Measured	906.61	2.86	-	-	7.21	16.36	-	-
	ABCD Method (82.13% correct allocation)	790.93	2.49	12.76	115.68	4.82	10.94	33.09	2.39
	ABCD Method (100% correct allocation)	903.11	2.84	0.39	3.50	7.21	16.36	0.00	0.00
	Standard VSP Method	1054.84	3.32	16.35	148.23	8.77	19.89	21.62	1.56

Based on Table 5, it can be seen that the ABCD method, when compared to reality, presents an average deviation of $13.1 \pm 0.3\%$ on fuel consumption, while the Standard VSP Method, when compared to reality, presents an average deviation of $13.4 \pm 3.0\%$. Moreover, the ABCD Method presents better estimates of electric energy consumption, with an average deviation of $29.1 \pm 4.0\%$ compared with $41.6 \pm 19.9\%$ for the Standard VSP Method, suggesting a better performance, demonstrated by estimating fuel and electric energy consumption with greater precision and accuracy. Additionally, the ABCD Method allows, as it was previously verified, to know in each second the propulsion modes being used by the vehicle, which is not possible to know through the Standard VSP Method.

It should also be underlined that the ABCD method can provide better estimates when the percentage of point correctly allocated increases (comparing Trip #1 and Trip #2), but particularly when all the points are correctly allocated, generating a deviation lower than 1%.

Table 6: Pollutant gas emission and associated absolute (e_a) and relative error (e_r)

		CO_2				CO			
		mass [g]	g/km	e_r [%]	e_a [g]	mass [g]	g/km	e_r [%]	e_a [g]
Trip#1	Measured	4441.93	77.33	-	-	54.78	0.95	-	-
	ABCD Method	3851.40	67.06	13.29	590.53	43.28	0.75	21.01	11.5
	Standard VSP Method	3981.58	69.32	10.36	460.35	48.92	0.85	10.71	5.86
Trip#2	Measured	2840.38	64.45	-	-	21.43	0.49	-	-
	ABCD Method	2467.72	55.99	13.12	372.66	26.71	0.61	24.64	5.28
	Standard VSP Method	3300.73	74.89	16.21	460.35	27.29	0.62	27.37	5.86
		HC				NO_x			
		mass [g]	g/km	e_r [%]	e_a [g]	mass [g]	g/km	e_r [%]	e_a [g]
Trip#1	Measured	0.75	0.013	-	-	0.86	0.015	-	-
	ABCD Method	0.05	0.001	93.34	0.7	0.93	0.016	8.35	0.07
	Standard VSP Method	0.59	0.010	22.26	0.16	1.07	0.019	24.78	0.21
Trip#2	Measured	0.31	0.007	-	-	1.14	0.026	-	-
	ABCD Method	0.03	0.000	89.23	0.28	0.66	0.015	42.57	0.48
	Standard VSP Method	0.48	0.011	54.03	0.17	0.93	0.021	18.58	0.21

Based on Table 6, the ABCD Method, when compared with reality and with the Standard VSP Method, again presented a reasonable performance estimating pollutant, with an average deviation of 38.2 ± 5.3 % compared to the Standard VSP Method that presented an average deviation of 23.1 ± 7.6 %. It should be noted that the pollutant estimates based on the ABCD Method presented, in at least one of the trips made, an accuracy higher to the Standard VSP Method, except in the estimation of HC emission (even though this pollutant is almost eliminated in the three-way catalyst).[27]

Table 7: Validation criteria, Utility Factor (UF) and relative error (e_r).

		$ \Delta SOC < 2\% SOC_{total}$	$ NEC < 1\% E_{Fuel}$	UF	e_r [%]
Trip#1	Measured	5.10 < 2%	1.37 < 1%	0.62	-
	ABCD Method	5.85 < 2%	1.11 < 1%	0.65	4.70
	Standard VSP Method	5.85 < 2%	1.36 < 1%	0.46	25.54
Trip#2	Measured	2.10 < 2%	0.76 < 1%	0.36	-
	ABCD Method	12.68 < 2%	1.69 < 1%	0.42	17.27
	Standard VSP Method	12.69 < 2%	1.73 < 1%	0.29	17.22

Based on Table 7 and despite there is no validation of the trip by any of the criteria, results suggest that the calculation of the Utility Factor based on the ABCD Method presents a good performance, particularly in the first trip, resulting in an average deviation of 10.9 ± 6.3 %. Generally, the ABCD Method estimates a CD regime superior to reality due to the ability to estimate different propulsion combination according to driving conditions (consumption, regeneration and neutral). On the other hand, the Standard VSP Method provides results with low accuracy when compared to reality, presenting an average deviation of $21.4 \pm 4.2\%$. It appears to be generally estimating a CD mode inferior to reality, due to its incapacity to detect different propulsion combination according to driving conditions, like the ABCD Method.

3.2.2 Vehicle B

The same approach was applied to Vehicle B. In Table 8, for Trip#1, the initial allocation shows the predominance of area C (only electric motor), with 0.5% on area B and 2.2% in area D. Using the generic algorithm, there was an overestimation of points on areas B and D. It should be underlined that the ICE was only operating for 92 s (areas B and D). Consequently, the percentage of correct points is globally low in these two areas due to the small sample and the difficulty to predict these areas. Nonetheless, the algorithm can predict correctly circa 85% of the Trip#1 areas. A similar analysis was made for Trip#2,

where the total percentage of positive matches between allocation and estimate is circa 82%. Once again, areas B and D are the most difficult to identify, resulting in a higher percentage of unallocated points.

Table 8: Comparison of existing and predicted points on the different areas of propulsion.

Propulsion Type	Trip#1				Trip#2			
	Real Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)	Real Allocation Points	Estimate Points	Correct Points	Percentage (%)
A	302	302	302	100.00	281	281	281	100.00
B	17	263	10	58.82	47	311	30	63.83
C	3003	2554	2519	83.88	2885	2381	2350	81.46
D	75	278	42	56.00	87	327	55	63.22
Unallocated	-	-	524	15.43	-	-	584	17.70
Total	3397	3397	2873	84.57	3300	3300	2716	82.30

Similarly to vehicle A and again despite the fact that there is no completely correct allocation, it is possible to estimate energy consumption (fuel and electricity) and emissions of polluting gases in a more rigorous manner due to the specific calculation for each propulsion area. Table 9 and Table 10 show the results obtained, as well as their relative and absolute errors when compared to reality.

Table 9: Energy consumption (Fuel and Electricity) and associated absolute (e_a) and relative error (e_r)

		Fuel				Electricity			
		<i>mass</i> [g]	<i>l/100</i> km	<i>e_r</i> [%]	<i>e_a</i> [g]	<i>energy</i> [kWh]	<i>kWh/100</i> km	<i>e_r</i> [%]	<i>e_a</i> [g]
Trip#1	Measured	54.10	0.174	-	-	5.70	13.20	-	-
	ABCD Method (84.57% correct allocation)	47.97	0.154	11.33	6.13	3.81	8.80	33.10	1.89
	ABCD Method (100% correct allocation)	53.93	0.173	0.32	0.17	5.70	13.20	0.00	0.00
	Standard VSP Method	62.76	0.202	16.00	8.66	3.18	7.30	44.20	2.52
Trip#2	Measured	80.00	0.249	-	-	6.16	13.86	-	-
	ABCD Method (82.30% correct allocation)	64.85	0.202	18.94	15.15	3.10	6.94	49.76	3.06
	ABCD Method (100% correct allocation)	77.93	0.242	2.59	2.07	6.16	13.86	0.00	0.00
	Standard VSP Method	71.21	0.222	11.00	8.79	3.84	8.62	37.75	2.32

Based on Table 9, the ABCD method, when compared to reality, presents an average deviation of $15.1 \pm 3.8\%$, while the Standard VSP Method has an average deviation of $13.5 \pm 2.5\%$. Regarding electric energy consumption, the Standard VSP Method obtained a better performance, with an average deviation of $40.9 \pm 3.4\%$ compared to the ABCD method, which presented an average deviation of $41.4 \pm 8.3\%$, slightly higher. This fact is associated, one more time, with the overestimation of modes "B" and "D" as previously mentioned and the predominance of the "C" propulsion mode. The absence of instants in which the thermal source is in operation provides some uncertainty, since this operating mode may be underestimated, which is particularly relevant if it is intended to study a more demanding driving cycle (Rural + Motorway) or longer. In both cases, performing an extra trip could help to better characterize the method developed, thus improving the estimate in question.

Once again, the importance of correctly allocation each driving point is crucial for a correct estimate. Assuming 100% correctly allocated points, it is possible to obtain a deviation on fuel use lower than 1.5%.

Table 10: Pollutant gas emission and associated absolute (e_a) and relative error (e_r)

		CO_2				CO			
		<i>mass</i> [g]	<i>g/km</i>	e_r [%]	e_a [g]	<i>mass</i> [g]	<i>g/km</i>	e_r [%]	e_a [g]
Trip#1	Measured	211.36	4.89	-	-	5.16	0.12	-	-
	ABCD Method	187.13	4.33	11.46	24.23	1.67	0.04	67.73	3.49
	Standard VSP Method	245.80	5.69	16.29	34.44	1.63	0.04	68.35	3.53
Trip#2	Measured	313.76	7.06	-	-	1.80	0.040	-	-
	ABCD Method	254.00	5.72	19.05	59.76	1.67	0.038	6.96	0.13
	Standard VSP Method	278.78	6.27	11.15	34.98	1.89	0.043	5.10	0.09
		HC				NO_x			
		<i>mass</i> [g]	<i>g/km</i>	e_r [%]	e_a [g]	<i>mass</i> [g]	<i>g/km</i>	e_r [%]	e_a [g]
Trip#1	Measured	0.12	0.003	-	-	0.12	0.002	-	-
	ABCD Method	0.13	0.003	4.73	0.01	0.22	0.005	86.29	0.1
	Standard VSP Method	0.14	0.003	9.78	0.02	0.26	0.006	123.39	0.14
Trip#2	Measured	0.18	0.0039	-	-	0.45	0.010	-	-
	ABCD Method	0.15	0.0033	17.28	0.03	0.31	0.007	30.59	0.14
	Standard VSP Method	0.16	0.0037	6.96	0.02	0.30	0.007	32.56	0.15

Based on Table 10, the ABCD Method, when compared with reality and with the Standard VSP Method, similar to the results obtained in the analysis of vehicle A, presented an excellent performance in estimating pollutants in this case, with an average deviation of 30.5 ± 23 % compared to the Standard VSP Method that presented an average deviation of 34.2 ± 31 %. The pollutant estimate based on the ABCD Method demonstrated to obtain a more accurate result in at least one of the trips made, and it should be noted that, in this case, unlike what happened in vehicle A, the HC estimate obtained is almost similar to

reality. On the other hand, it is clearer in the vehicle B results that the performance of the ABCD Method is better than the performance of the Standard VSP Method, demonstrated by the results obtained for NO_x emission, in which the ABCD Method showed a better accuracy in both trips.

Table 11: Validation criteria, Utility Factor (UF) and relative error (e_r).

		$ \Delta SOC < 2\%SOC_{total}$	$ NEC < 1\%E_{Fuel}$	UF	e_r [%]
Trip#1	Measured	$7.47 < 2\%$	$10.04 < 1\%$	0.48	-
	ABCD Method	$3.22 < 2\%$	$1.23 < 1\%$	0.54	19.1
	Standard VSP Method	$3.22 < 2\%$	$1.19 < 1\%$	0.59	28.4
Trip#2	Measured	$1.14 < 2\%$	$7.17 < 1\%$	0.46	-
	ABCD Method	$3.98 < 2\%$	$1.42 < 1\%$	0.61	32.1
	Standard VSP Method	$3.98 < 2\%$	$1.44 < 1\%$	0.58	24.9

Based on Table 11, validation criteria are rarely verified, similarly to what had already been seen in the results of vehicle A, justified once again by the adaptation of the data collected to the present study. The calculation of the Utility Factor based on the ABCD Method presents an average deviation of $25.6 \pm 6.5\%$. The Standard VSP Method, generally estimates a CD regime inferior to reality presenting an average deviation of $26.7 \pm 1.8\%$. In this case, it is not absolutely clear the positive impacts of the ABCD Method due to the scarcity of characteristic points of modes "B" and "D", benefiting the performance of the Standard VSP Method.

4 CONCLUSIONS

The complexity associated to PHEV energy management brings questions on what is the effective energy use under real-world conditions. Consequently, this paper develops a method capable of predicting the SOC indirectly, a method capable of allocating the PHEV energy use under different energy management strategies (ABCD Method) and

using these methods, estimating energy consumption, pollutant gas emissions and the Utility Factor associated to the two PHEV under study.

Results enabled obtaining very good correlations between estimated SOC and measured SOC ($R^2 > 0,99$) and linear slope close to 1. Regarding the objective of predicting the source (or sources) of energy in each second of driving, a generic algorithm was developed using only dynamic data (speed, acceleration, VSP). The results showed that, when applied to the two vehicles under study, it allowed a correct allocation in average of 82.2% of the trip points. The great difficulty was to differentiate areas B and D, where the ICE can be the only source of energy or is assisted by the electric motor.

Considering the two trips and two PHEV tested and a generic algorithm to allocate different propulsion combinations, the ABCD Method can predict the parameters under study in comparison with reality with an average deviation of $14.1\% \pm 3.3\%$ regarding fuel use and CO₂ emissions, $35.3\% \pm 10.4\%$ for electric energy consumption, $30.1\% \pm 26.2\%$ for CO, $51.1\% \pm 46.7\%$ for HC and $42.0\% \pm 32.8\%$ for NO_x. Similarly, the Standard VSP Method demonstrates an average deviation of $13.4\% \pm 3.2\%$ for fuel use and CO₂ emissions, $41.3\% \pm 16.5\%$ for electric energy consumption, $27.9\% \pm 28.6\%$ for CO, $23.3\% \pm 21.6\%$ for HC and $49.8\% \pm 49.4\%$ for NO_x.

Although both methods generate comparable deviations, the ABCD method allows, in a 1Hz basis, to estimate the energy source with for over 80% of driving data, providing more information than originally collected. Moreover, it has been shown that the ABCD Method provides better estimates for higher rates of propulsion points correctly allocated, with errors below 1.5% for the 4 trips and 2 vehicles tested.

Moreover, future development include the improvement of the ABCD Method, by analyzing more test data in real driving conditions improving the correlations already made (Fuel, Energy and Pollutants) and that demonstrated an algorithm capable of

reliably predicting, application of algorithms with the ability to computationally optimize the dynamic intervals that define each propulsion zone, as well to modify the analysis approach, creating a more specific method for each vehicle that can result in a lower relative error lower to the one presented.

These results also underline a limitation of current test procedures and OBD standards: for RDE tests is not necessary to measure battery information, although the propulsion system management can lead to different energy use and emission outcomes; and there is little information on battery use obtained from OBD, apart from SOC. In the future, regulations could be introduced to enforce the availability of battery end electric motor parameters for regulatory enforcement or by introducing block exemption regulations extensible to the electric parts of the vehicle, similarly to what was done to promote competition on repairing and maintenance on conventional vehicles, which has enabled standard OBD parameters.

In conclusion, the ABCD Method is of major importance for improving the VSP methodology, where energy use and pollutant outcomes are only based on the VSP values provided only by a driving schedule, without information on the propulsion system used. Moreover, regarding the current RDE driving data analysis tools used by the European Commission, there is also no information on which propulsion system is used on a PHEV. Particularly for EMROAD [28][29], this type of information can be useful to build and validate the windows used on the analysis of RDE tests.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge Fundação para a Ciência e Tecnologia for IN+ Strategic Project UID/EEA/50009/2019 and for contract CEECIND/02589/2017.

DISCLAIMER

The opinions expressed in this manuscript are those of the authors and should in no way be considered to represent the official opinion of the AVL company and its affiliates.

REFERENCES

- [1] Transport D-G for M and. EU transport in figures Statistical pocketbook 2020. 2020. <https://doi.org/10.2832/491038>.
- [2] Commission E. A European Strategy for Low-Emission Mobility {SWD(2016) 244 final}. Brussels: 2016.
- [3] Iea, Rathjens GW, Iea, Shrink That Footprint, Aguirre K, Eisenhardt L, et al. Electric vehicles in Europe: gearing up for a new phase? *Energy* 2014;3:33.
- [4] Amjad S, Rudramoorthy R, Neelakrishnan S, Varman KSR, Arjunan T V. Impact of real world driving pattern and all-electric range on battery sizing and cost of plug-in hybrid electric two-wheeler. *J Power Sources* 2011;196:3371–7. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.080>.
- [5] Hofman T. Hybrid drive train technologies for vehicles. *Altern Fuels Adv Veh Technol Improv Environ Perform Towar Zero Carbon Transp* 2014:567–81. <https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.567>.
- [6] European Commission and Council of the European Union. Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) 2017/1151 for the purpose of improving the emission type approval tests and procedures for light passenger and commercial vehicles, including those for in-service conformity and real-dr. *Off J Eur Union* 2018.
- [7] Varella R, Giechaskiel B, Sousa L, Duarte G. Comparison of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) with Laboratory Grade Equipment. *Appl Sci* 2018;8:1633. <https://doi.org/10.3390/app8091633>.
- [8] Zhou Y, Ravey A, Péra MC. A survey on driving prediction techniques for predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicles. *J Power Sources* 2019;412:480–95. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.085>.
- [9] Gonder J, Markel T. Energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *SAE Tech Pap* 2007;2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0290>.

- [10] Schouten NJ, Salman MA, Kheir NA. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2002;10:460–8. <https://doi.org/10.1109/87.998036>.
- [11] Liu J, Peng H. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2008;16:1242–51. <https://doi.org/10.1109/TCST.2008.919447>.
- [12] Shams-Zahraei M, Kouzani AZ, Kutter S, Bäker B. Integrated thermal and energy management of plug-in hybrid electric vehicles. *J Power Sources* 2012;216:237–48. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.055>.
- [13] Schmid R, Bürger J, Bajcinca N. A comparison of PMP-based Energy Management Strategies for Plug-in-Hybrid Electric Vehicles. *IFAC-PapersOnLine* 2019;52:592–7. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.094>.
- [14] Chen Z, Mi CC, Xia B, You C. Energy management of power-split plug-in hybrid electric vehicles based on simulated annealing and Pontryagin’s minimum principle. *J Power Sources* 2014;272:160–8. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.057>.
- [15] Kim N, Rousseau A, Lee D. A jump condition of PMP-based control for PHEVs. *J Power Sources* 2011;196:10380–6. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.07.003>.
- [16] Sun C, Sun F, He H. Investigating adaptive-ECMS with velocity forecast ability for hybrid electric vehicles. *Appl Energy* 2017;185:1644–53. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.026>.
- [17] Xiong R, Cao J, Yu Q. Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle. *Appl Energy* 2018;211:538–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.072>.
- [18] Xie S, Hu X, Qi S, Lang K. An artificial neural network-enhanced energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. *Energy* 2018;163:837–48. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.139>.

- [19] Electric Vehicle Database n.d. <https://ev-database.org/>.
- [20] Varella RA, Faria M V., Mendoza-Villafuerte P, Baptista PC, Sousa L, Duarte GO. Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions. *Sci Total Environ* 2019;658:879–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.053>.
- [21] Jiménez-Palacios JL. Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing. Massachusetts Inst Technol Cambridge 1999.
- [22] Zhai H, Frey HC, Roupail NM. A vehicle-specific power approach to speed- and facility-specific emissions estimates for diesel transit buses. *Environ Sci Technol* 2008;42:7985–91. <https://doi.org/10.1021/es800208d>.
- [23] Frey HC, Roupail NM, Zhai H, Farias TL, Gonçalves GA. Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. *Transp Res Part D Transp Environ* 2007;12:281–91. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.03.003>.
- [24] Superseding IR, Definitions UF, Electric P, Using V, Survey T, Rationale D, et al. J2841 - Utility Factor Definitions for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Travel Survey Data. SAE Int 2010.
- [25] Society of Automotive Engineers. Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles, Including Plug-in Hybrid Vehicles (J1711 Ground Vehicle Standard) - SAE Mobilus. SAE Int 2010.
- [26] Gilbert A McCoy; John G Douglass; Motor Challenge Program (U.S.). Energy efficient electric motor selection handbook. vol. 110. 1996.
- [27] Hasan AO, Abu-Jrai A, Al-Muhtaseb AH, Tsolakis A, Xu H. HC, CO and NO_x emissions reduction efficiency of a prototype catalyst in gasoline bi-mode SI/HCCI engine. *J Environ Chem Eng* 2016;4:2410–6. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.04.015>.

- [28] European Commission and Council of the European Union. Commission Regulation (EU) 2016/427 of 10 March 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6) (Text with EEA relevance). Off J Eur Union 2016;82:1–98.
- [29] Clairotte M. The introduction of the Real-Driving Emissions procedure in the European type-approval process and the EMROAD tool. 2017.