

**Avaliação energética de estratégias de gestão de operação
em veículos híbridos elétricos *plug-in***

Hugo Quitério Ferreira

Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão da Energia

Orientadores: Dr. Patrícia de Carvalho Baptista

Dr. Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri

Presidente: Prof. Edgar Caetano Fernandes

Orientador: Dr. Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Vogal: Prof. Luís Alberto Gonçalves de Sousa

Julho 2020

Agradecimentos

À Dr. Patrícia Baptista e ao Dr. Gonçalo Duarte pelo apoio e disponibilidade demonstrados na orientação deste trabalho.

Aos meus pais, que durante todo o meu percurso académico me deram os meios necessários para alcançar o que alcancei e me colocaram sempre na frente das suas prioridades.

Aos meus amigos e colegas que fizeram da minha vida académica uma experiência muito melhor.

À Mariana pelo apoio que nunca se recusou a dar-me e que me fez ter força durante todo este trabalho.

Aos professores que me deram as bases necessárias para terminar esta etapa da minha vida.

Abstract

The aim of this work was to assess control strategies of the electric motor (EM) and internal combustion engine (ICE) in the operation of a plug-in hybrid vehicle (PHEV). For that purpose, two plug-in hybrid electric vehicles (PHEV), "A" and "B", were monitored during two trips and their dynamic data, energy consumption and emissions were recorded. Models were created to predict the operation of both ICE and EM. A matrix of operating zones was created gathering data of each second of the trip according to the powertrain used at each moment. The developed analysis allowed to estimate energy consumption and emissions in charge depleting (CD) and charge sustaining (CS) modes. Vehicle A is more dependent on the ICE, using it in 27% of the route in CD and 84% on CS, compared to only 4% in CD and 67% in CS on vehicle B. Consequently, energy consumption was higher for vehicle A (2.7 l/100km on CD and 7.2 l/100km on CS) when compared to B (0.2 l/100km on CD and 4.4 l/100km). Carbon dioxide emissions followed similar pattern, being CS emissions greater than the European target for 2021 of 95 g/km (A: 171 g/km, B: 103 g/km). Hydrocarbons and nitrogen oxides were more emitted in CD as there were more cold starts from the ICE. Vehicle A was the least economical option accounting for fuel and electricity, ranging from 0.078 to 0.110 € / km, compared to 0.037 to 0.068 €/km for B, for the distances and charging options studied.

Keywords: Plug-in hybrid electric vehicle, charge depleting, charge sustaining, emissions, consumption, costs

Resumo

O objetivo do trabalho foi avaliar quais as estratégias de controlo e gestão do motor elétrico (EM) e do motor de combustão interna (ICE) no funcionamento de um veículo híbrido *plug-in* (PHEV). Dois PHEV ("A" e "B") foram monitorizados durante duas viagens recolhendo-se os dados dinâmicos, consumos energéticos e emissões. Os modelos desenvolvidos foram criados para prever o funcionamento do ICE e EM. Foi criada uma matriz de zonas de funcionamento com o âmbito de agrupar os dados de cada segundo da viagem consoante os motores utilizados a cada instante. As análises realizadas permitiram analisar consumos e emissões em depleção de carga (CD) e sustentação de carga (CS). O veículo A é mais dependente do ICE, utilizando-o em 27% do trajeto em CD e 84% em CS, face aos apenas 4% em CD e 67% em CS utilizados pelo veículo B. Consequentemente, os consumos foram maiores para o veículo A (2.7 l/100km em CD e 7.2 em CS) quando comparado com B (0.2 l/100km em CD e 7.2 l/100km). As emissões de dióxido de carbono seguiram o mesmo padrão, sendo as emissões em CS superiores à meta europeia para 2021 de 95 g/km (A: 171 g/km, B: 103 g/km). As emissões de hidrocarbonetos e óxidos de azoto foram superiores em CD pois ocorreram mais arranques a frio do ICE. O veículo A revelou-se a opção menos económica contabilizando combustível e eletricidade, variando entre 0.078 a 0.110 €/km, face aos 0.037 a 0.068€ de B, para as distâncias e carregamentos estudados.

Palavras-chave: Veículo híbrido elétrico *plug-in*, depleção de carga, sustentação de carga, emissões, consumos, custos

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação	1
1.3. Objetivo	4
1.4. Estrutura da tese.....	5
2. Estado da Arte	7
2.1. Descrição de funcionamento de um PHEV.....	7
2.2. Impactes da utilização de um PHEV.....	11
2.3. Gestão de operação e otimização de utilização de um PHEV	14
3. Metodologia	16
3.1. Veículos e viagens monitorizadas.....	19
3.1.1. Descrição das viagens	19
3.1.2. Veículos utilizados.....	19
3.2. Metodologia Vehicle Specific Power	21
3.3. Desenvolvimento de modelos.....	23
3.3.1. Modelo de previsão de funcionamento do ICE	23
3.3.2. Modelo de variação de SOC em função de VSP e Modelo de consumo elétrico	24
3.3.3. Definição das zonas de funcionamento de um PHEV	25
3.4. Descrição das análises realizadas.....	27
3.5. Descrição das avaliações de impactes por distância percorrida e por frequência de carregamento	27
3.5.1. Carregamento elétrico: Opções consideradas.....	27
4. Resultados e discussão	29
4.1. Previsão de funcionamento de ICE	29
4.2. Curva de SOC	31
4.3. Análise por zonas de funcionamento (Depleção de Carga)	35
4.4. Análise por modo VSP	46
4.5. Avaliação de impactes por distância percorrida	59
4.6. Avaliação de impactes da frequência de carregamento.....	62
5. Conclusões e trabalho futuro	68

5.1. Trabalho futuro	70
6. Referências	71

Índice de tabelas

Tabela 2-1 - Exemplos de PHEV com diferentes arquiteturas [20]	10
Tabela 2-2 - BEV vs. PHEV (Comparação)	12
Tabela 3-1 - Características das viagens realizadas pelos veículos A e B	19
Tabela 3-2 - Informações sobre os veículos analisados, [20],[34]	20
Tabela 3-3 - Modos do VSP (adaptado de [38])	22
Tabela 3-4 - Matriz de zonas de funcionamento de PHEV.....	26
Tabela 3-5 - Preço de carregamento rápido (Estação de Serviço Repsol 2ª Circular - Sul/Norte)[41],[40]	28
Tabela 4-1 - Parâmetros para modelo de funcionamento do ICE - Veículo A e Veículo B.....	29
Tabela 4-2 - Distâncias percorridas em cada zona de funcionamento (veículo A)	36
Tabela 4-3 - Distâncias percorridas em cada zona de funcionamento (veículo B)	41
Tabela 4-4 - Emissões locais por modo VSP (Veículo A)	52
Tabela 4-5 – Emissões locais por modo VSP (Veículo B): Valores médios e intervalos de confiança 95% (t-student).....	58
Tabela 4-6 – Consumo de gasolina e emissões de poluentes locais para as viagens realizadas pelo veículo A e veículo B.....	59
Tabela 4-7 - Distância percorrida em função da frequência de carregamento	62
Tabela 4-8 - Dados de emissões e consumo do veículo convencional mais vendido em 2019 (Portugal)[53]	63
Tabela 4-9 - Custos totais de combustível e eletricidade consoante a frequência de carregamento: a) Veículo A; b) Veículo B	64

Índice de figuras

Figura 1-1 – Implementação de veículos elétricos (motociclos não incluídos) no mercado mundial nos últimos anos (adaptado de [6]).....	2
Figura 1-2 - Previsão da evolução do número de veículos com motor elétrico em circulação (motociclos não incluídos, segundo a campanha EV30@30 (adaptado de [6], [7])	2
Figura 1-3 - Evolução do preço de baterias (adaptado de [9])	3
Figura 2-1 - Mixte, o primeiro veículo híbrido [14]	7
Figura 2-2 - O primeiro modelo do Toyota Prius, 1997	8
Figura 2-3 - Renault Kangoo Elect'road (2003), o primeiro PHEV a ser comercializado.	9
Figura 2-4 - Tipos de arquitetura de PHEV, em série à esquerda e em paralelo à direita (adaptado [19])	9
Figura 2-5 - Modos de funcionamento de um PHEV (adaptado de [19])	10
Figura 2-6 – ACV de vários tipos de motorização automóvel na Europa (adaptado de [6]). Cálculos realizados para veículos com performances semelhantes em termos dinâmicos e mecânicos.	13
Figura 3-1 - Esquema metodológico	17
Figura 3-2 - Avaliação Global vs. Avaliação Segundo a Segundo	18
Figura 3-3 - Exemplo do consumo de combustível em função do valor de VSP (adaptado de [39]) ...	22
Figura 3-4 - Distribuição temporal dos valores de VSP em condução urbana(adaptado [39])	23
Figura 3-5 - Parâmetros ativação/desativação para um PHEV (Modelo previsão funcionamento do ICE)	24
Figura 3-6 - Modelo variação instantânea de SOC em função do VSP (adaptado [32]).....	25
Figura 4-1 - Previsão de funcionamento do ICE (Veículo A): a) (em cima) Viagem 1; b) (em baixo) Viagem 2	30
Figura 4-2 - Previsão de funcionamento do ICE (Veículo B): a) Viagem 1; b) Viagem 2.....	30
Figura 4-3 - Curva estimativa de consumo de SOC em função de VSP – veículo A	31
Figura 4-4 – Consumo real vs. Estimado para o veículo A: a) viagem 1 (em cima); b) viagem 2 (em baixo).....	32
Figura 4-5 - Curva estimativa de consumo de SOC em função de VSP - veículo B.....	33
Figura 4-6 - Consumo real vs. Estimado para o veículo B: a) viagem 1 (em cima); b) viagem 2 (em baixo).....	34
Figura 4-7 - Distribuição temporal: a) Por zonas de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE....	35
Figura 4-8 - Veículo A - Distâncias percorridas: a) Por zona de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE	36
Figura 4-9 - Dados dinâmicos representados por zonas (Veículo A): a) Aceleração; b) Velocidade; c) VSP	37
Figura 4-10 – Consumo de gasolina (veículo A): a) consumo médio por segundo; b) consumo total por km.....	37
Figura 4-11 - Emissões de poluentes locais (veículo A) (1- emissões médias por segundo; 2- emissões totais por km): A) CO ₂ ; B) CO; C) HC; D) NO _x	38

Figura 4-12 – Emissões e consumos globais (veículo A) – a) consumo total de gasolina (l); b) emissões totais de CO (g); c) emissões totais de HC (g); d) emissões totais de NO _x	39
Figura 4-13 – Veículo B - Distribuição temporal: a) Por zonas de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE	40
Figura 4-14 – Veículo B - Distâncias percorridas: a) Por zona de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE	41
Figura 4-15 - Dados dinâmicos representados por zonas (Veículo B): a) Aceleração; b) Velocidade; c) VSP	42
Figura 4-16 - Consumo de gasolina (veículo B)	43
Figura 4-17 - Emissões de poluentes locais (veículo B) (1- emissões médias por segundo; 2- emissões totais por km percorrido): A) CO ₂ ; B) CO; C) HC; D) NO _x	43
Figura 4-18 – Emissões e consumos globais (veículo A) – a) consumo total de gasolina (l); b) emissões totais de CO (g); c) emissões totais de HC (g); d) emissões totais de NO _x	44
Figura 4-19 - Distribuição temporal por modo VSP em CD e CS (veículo A)	46
Figura 4-20 – Veículo A: a) Aceleração (m/s ²) ; b) diferença relativa em percentagem (CS-CD).....	47
Figura 4-21 – Veículo A: a) Velocidade (km/h) ; b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)	47
Figura 4-22 – Veículo A: a) Consumo de gasolina (l/100km); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)	48
Figura 4-23 – Percentagem de tempo com ICE desativado (veículo A)	48
Figura 4-24 – Consumo global do veículo A em CD: a) consumo por motor (MJ/s); b) fração do consumo total de energia consumida por motor (em baixo)	49
Figura 4-25 – Rendimento dos motores (EM + ICE) por modo VSP em CD.....	50
Figura 4-26 - Distribuição temporal por modo VSP em CD e CS (veículo B)	53
Figura 4-27 – Veículo B: a) Aceleração por modo VSP (m/s ²); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD).....	53
Figura 4-28 – Veículo B: a) Velocidade por modo VSP (km/h); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD).....	54
Figura 4-29 – Veículo B: a) Consumo de gasolina (l/100km); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)	54
Figura 4-30 – Percentagem de tempo com ICE desativado (veículo B)	55
Figura 4-31 – Consumo global do veículo B em CD: a) consumo por motor (MJ/s) (em cima); b) fração do consumo total de energia consumida por motor (em baixo).....	56
Figura 4-32 – Rendimento dos motores (EM + ICE) por modo VSP em CD.....	57
Figura 4-33 - Consumo de combustível por distância total de viagem: a) consumo total; b) consumo médio acumulado	60
Figura 4-34 - Emissões de poluentes locais (1- emissões totais; 2- emissões médias acumuladas) – a) CO ₂ , b) CO, c) HC, d) NO _x	61
Figura 4-35 - Consumo e custo acumulado da gasolina em função da frequência de carregamento .	63
Figura 4-36 – Custo por km percorrido (gasolina e eletricidade), tendo em conta a frequência e o tipo de carregamento	65

Figura 4-37 - Emissões de poluentes locais em função da frequência de carregamento; a) CO₂; b) CO;
c) HC; d) NO_x 66

Nomenclatura

PHEV – Veículo híbrido elétrico *plug-in*

HEV – Veículo híbrido elétrico

EV – Veículo elétrico

BEV – Veículo elétrico a bateria

ICEV – Veículo com motor de combustão

ICE – Motor de combustão interna

EM – Motor elétrico

CD – Depleção de carga

CS – Sustentação de carga

SOC – Estado de carga

UE – União Europeia

CEM – *Clean Energy Ministerial*

GEE – Gases de efeito estufa

ACV – Avaliação de ciclo de vida

WTT – *Well to tank*

TTW – *Tank to wheel*

WTW – *Well to Wheel*

CTG – *Craddle to grave*

GO – Gestão de operação

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Na sociedade atual, a mobilidade é parte fulcral das rotinas diárias de uma grande parte da população mundial. A popularização dos veículos privados ocorreu devido à massificação da sua produção industrial, permitindo às classes mais baixas adquirir o seu automóvel particular.

Nos países desenvolvidos o uso de automóvel particular está já enraizado no quotidiano das pessoas. Segundo um estudo da Eurostat, em 2016 no continente europeu por cada 1000 habitantes circulam 505 automóveis privados, sendo em Portugal a média um pouco menor (470 carros por 1000 habitantes)[1]. Nos países em desenvolvimento o número de veículos per capita é menor hoje em dia, mas a tendência dos anos recentes demonstra que dentro de poucos anos esse número será significativamente mais elevado [2].

A crescente motorização a nível global exerce pressão sobre os ecossistemas, cada vez mais ameaçados pelos impactes resultantes do número crescente de veículos em circulação. Apesar da evolução tecnológica ter permitido uma melhoria substancial nos veículos convencionais modernos tanto em termos de consumo de energia e emissões de dióxido de carbono (CO₂)[3], mas também ao nível de poluentes locais (como os óxidos de azoto [NO_x], monóxido de carbono [CO] e hidrocarbonetos [HC]), o sector dos transportes continua a ser um dos principais responsáveis pelas emissões de dióxido de carbono. No que toca à totalidade dos gases efeito de estufa (GEE), o sector automóvel é já a segunda fonte mais emissora na União Europeia, tendo ultrapassado o sector da indústria em 2009 (atualmente responsável pela emissão de mais de 900 milhões de toneladas de CO_{2 eq.}) [4]. Desta forma, é imperativa a implementação de medidas que levem a uma redução de emissões neste sector, sendo a alteração do paradigma da indústria da mobilidade uma solução que deve ser aplicada a curto prazo.

1.2. Motivação

Segundo a ONU, para atingir um desenvolvimento sustentável deve-se “satisfazer as necessidades do presente sem comprometer e salvaguardando a proliferação das gerações futuras” [3], devendo por isso as necessidades de deslocação da população terão de ser garantidas, porém equacionando novas alternativas aos meios de transporte convencionais. A implementação de motores elétricos mais eficientes que os convencionais motores térmicos nos veículos tem sido uma das medidas mais populares no que respeita à alteração de paradigma no sector automóvel, uma vez que a eletrificação crescente dos veículos automóveis levou ao seu desenvolvimento, ganhando alguma escala na sua produção, tendo levado a um declínio do preço dos mesmos, tornando os veículos com motores elétricos mais competitivos no mercado [5]. Em 2017 atingiu-se o número de 3 milhões de veículos elétricos em circulação, tendo havido um crescimento de mais de 50% face aos números de 2016. Em 2018, o crescimento foi ainda maior (cerca de 63% face a 2017), tendo-se ultrapassado os 5 milhões

de veículos elétricos . Estima-se também que em 2030, o número de veículos com motor elétrico em circulação atinja um valor na ordem dos 130 milhões, podendo este valor aumentar para os 250 milhões caso novas políticas sejam implementadas para atingir objetivos ambientais, mais concretamente através da campanha criada pelo *Clean Energy Ministerial* (CEM) de promoção da mobilidade elétrica EV30@30 que procura gerar condições para em 2030 30% dos automóveis vendidos serem de propulsão elétrica como se pode verificar nas **Figura 1-1** e na **Figura 1-2** [6], [7].

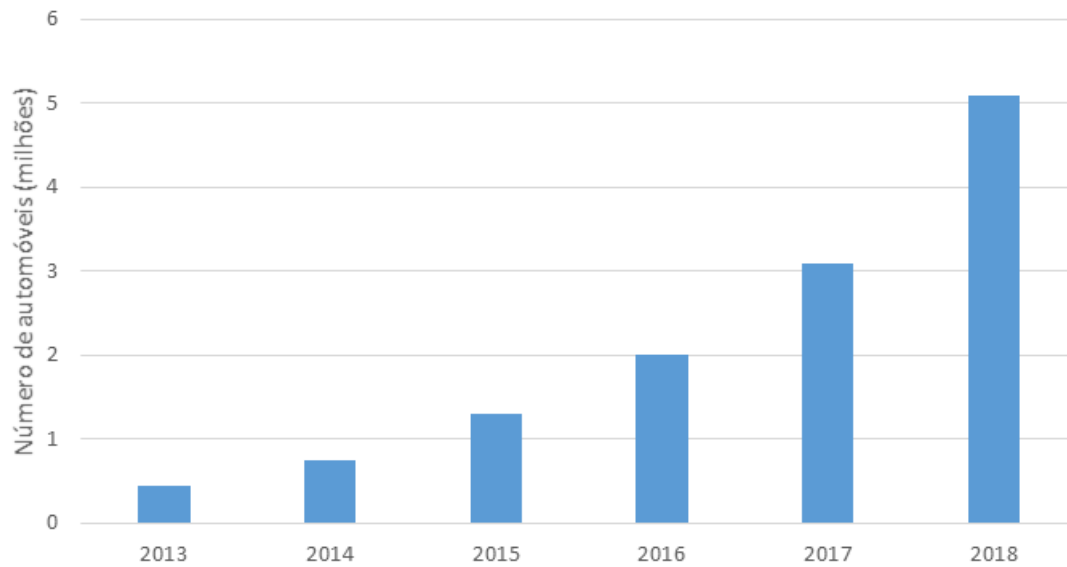


Figura 1-1 – Implementação de veículos elétricos (motociclos não incluídos) no mercado mundial nos últimos anos (adaptado de [6])

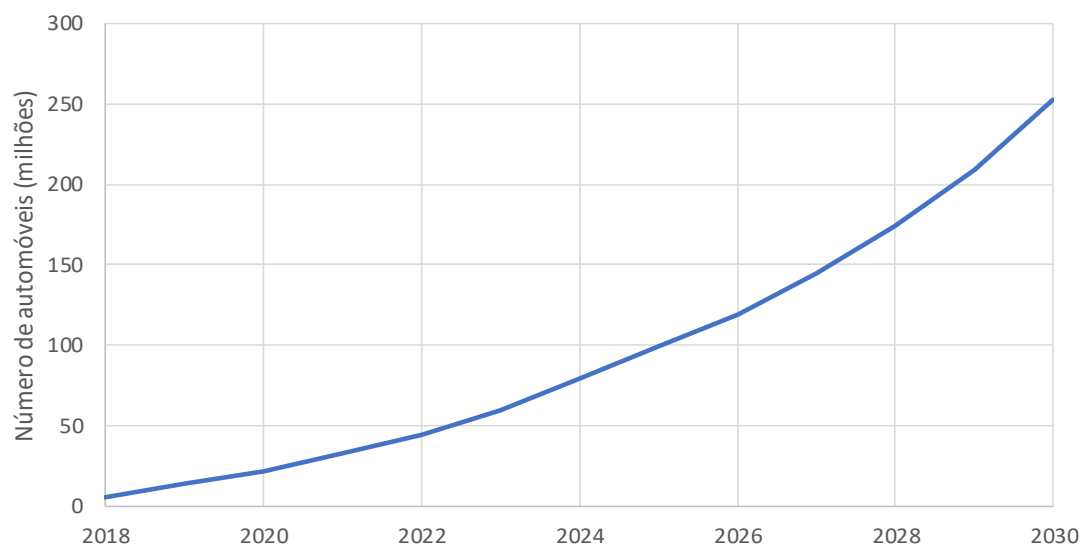


Figura 1-2 - Previsão da evolução do número de veículos com motor elétrico em circulação (motociclos não incluídos, segundo a campanha EV30@30 (adaptado de [6], [7])

A eletrificação dos sistemas de propulsão dos veículos começou pela hibridização dos mesmos (HEV – Veículos híbridos elétricos), com a presença de um motor elétricos e uma pequena bateria a bordo que auxiliavam o motor térmico em determinadas condições de circulação (maioritariamente a baixas velocidades), e expandiu-se através dos veículos elétricos a bateria (BEV, utilizando somente eletricidade na sua propulsão) e dos veículos híbridos elétricos plug-in (PHEV, que combinam um HEV com a possibilidade de carregamento na rede). Na família dos veículos elétricos o maior desenvolvimento tecnológico tem ocorrido nos BEV[5], que para circuitos citadinos e/ou de curta distância parecem alternativas mais interessantes, uma vez que estão limitados à capacidade da sua bateria. Porém, no ponto de vista da autonomia, estes veículos são ainda inconvenientes para deslocamentos de grandes distâncias, quando comparados com veículos com motores de combustão interna (ICEV – veículos com motor de combustão interna). Os PHEV permitem colmatar esta lacuna, apresentando-se como uma alternativa viável à atual frota automóvel, fazendo uma ponte entre os veículos elétricos e os veículos de combustão interna. As baterias dos PHEV possuem capacidades menores quando comparadas com os EV, mas maiores quando comparados com a dos HEV.

O desenvolvimento tecnológico tem levado à diminuição do preço deste tipo de veículos, alavancado maioritariamente pelo preço das baterias e pelo facto de existir maior produção de veículos, havendo dessa forma um aumento da competitividade económica dos mesmos[5], tal como se pode verificar na **Figura 1-3**. Apesar do desenvolvimento tecnológico, os PHEV são ainda veículos caros comparados com os seus equivalentes ICEV, sendo a sua aquisição apenas vantajosa no contexto empresarial devido aos incentivos fiscais assegurado às empresas [8]. Outros fatores como a autonomia das baterias, o tempo de carregamento e o número de postos de carregamento reprimem o crescimento do número de PHEV em circulação [5].

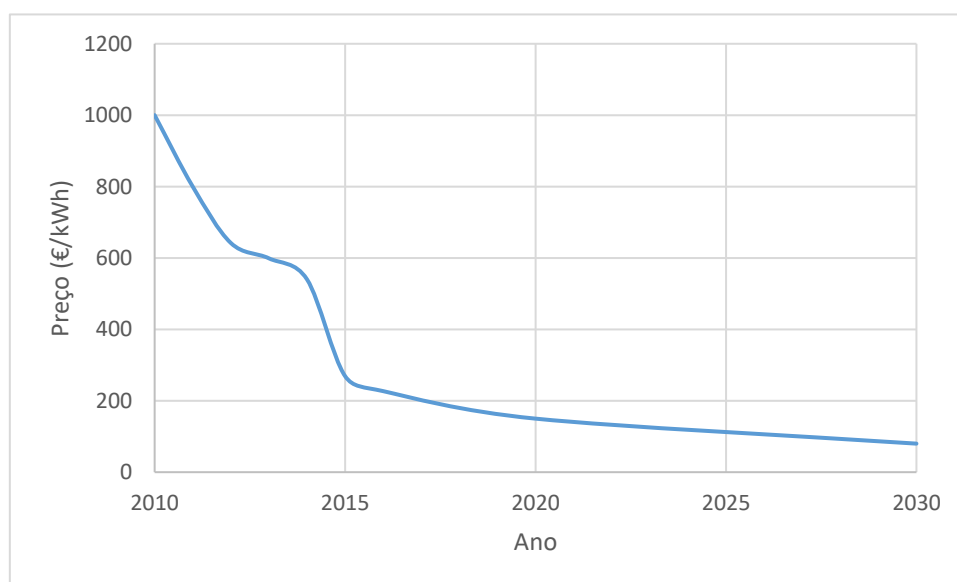


Figura 1-3 - Evolução do preço de baterias (adaptado de [9])

No caso particular dos PHEV existe uma componente adicional à qual ainda está associada alguma incerteza. A distância percorrida entre oportunidades de carregamento é um fator importante na otimização do consumo energético. Quando o utilizador tem acesso a um carregamento frequente possui uma vantagem financeira, uma vez que para condições de condução com menor acesso ao carregamento de um PHEV o custo total do veículo irá ser maior, isto porque os condutores com mais oportunidades de carregamento irão ter mais acesso a energia elétrica da rede, mais barata que os combustíveis convencionais [10], e uma vantagem energética, pois o motor elétrico possui um rendimento maior que o motor térmico

Os PHEV têm também um papel importante no cumprimento das metas de emissões de CO₂ aplicadas aos fabricantes de automóveis. As emissões de poluentes por quilómetro dos veículos de passageiros na Europa cresceram de 2017 para 2018, o que faz dos veículos com propulsão elétrica, onde se incluem os PHEV, alternativas que permitirão alcançar os objetivos propostos pela União Europeia de diminuir as emissões de CO₂ para valores abaixo dos 95g/km até 2021[11]. As emissões dos PHEV estão diretamente associadas à autonomia elétrica dos mesmos na medida em que quanto maior for o fator de capacidade (relação entre os quilómetros percorridos com propulsão elétrica e o total de quilómetros percorrido pelo carro) menor será o seu consumo de combustível e consequentemente menor serão as suas emissões. Por outro lado, para PHEV com maior autonomia, possuem necessariamente baterias de maior capacidade, o que leva a uma maior emissão indireta de poluentes, uma vez que a intensidade energética dos processos industriais de desenvolvimento de baterias é proporcional às dimensões [12].

Apesar da importância dos PHEV para as diminuições das emissões de poluentes, não existe ainda um número significativo de análises empíricas dos consumos energéticos e impactes ambientais deste tipo de veículos que confirmem em contexto real as vantagens da sua utilização. Consequentemente, com esta dissertação, pretende-se avaliar o desempenho em contexto real de utilização de um PHEV, tendo em consideração a sua gestão energética e de emissões.

1.3. Objetivo

Neste contexto de penetração de tecnologias alternativas no sector dos transportes, e tendo em consideração que os veículos PHEV serão adequados a determinados tipos de utilizadores, torna-se crucial entender como é feita a gestão energética dos dois sistemas de propulsão a bordo do veículo. No entanto, a avaliação do perfil energético de um PHEV é uma tarefa de complexidade superior quando comparada com outros tipos de veículos, uma vez que a fonte de propulsão utilizada a cada instante pelo PHEV varia com as condições de condução [12]. Por conseguinte, o objetivo do trabalho será avaliar quais as estratégias de controlo e gestão do motor elétrico e do motor de combustão interna no funcionamento de um PHEV e quais os impactes energéticos e ambientais associados, estimando os impactes da distância percorrida e da frequência de carregamento. Para tal foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- Definir as estratégias de gestão de energia dos veículos.

- Utilizar os dados recolhidos para desenvolver modelos de previsão de consumo energético.
- Analisar os impactes das condições de condução nos consumos e emissões.
- Desenvolver uma metodologia que permita a avaliação completa do desempenho de um PHEV.
- Avaliar tipologia de comportamentos de frequência de carregamento e de efeitos da distância percorrida que permitam uma utilização mais eficiente dos PHEV

1.4. Estrutura da tese

Esta tese encontra-se dividida em cinco secções principais, cada uma delas dividida em subsecções.

Na secção **1** é introduzido o assunto do trabalho, sendo realizado um enquadramento ao leitor do tema estudado. No capítulo é ainda exposta a motivação do trabalho e os objetivos propostos de acordo com os problemas levantados.

Na secção **2** é feito um levantamento do estado da arte na temática da mobilidade elétrica incidindo sobretudo nos PHEV. É feita uma descrição do funcionamento deste tipo de veículos e considerada alguma literatura relativa a impactes da utilização de PHEV e a gestão de operação e otimização de utilização dos mesmos.

Na secção **3** é descrita a metodologia proposta. É feita inicialmente uma descrição das viagens de estudo realizadas e dos veículos considerados. De seguida é descrita a metodologia *Vehicle Specific Power* (VSP). São descritos também os modelos criados para a análise de dados, como a previsão de funcionamento do ICE, o modelo de variação de SOC em função do valor instantâneo de VSP e a definição da matriz de zonas de funcionamento. Por fim, é feita a descrição das análises e avaliações realizadas, sendo ainda descritas as opções de pagamento e os tipos de carregamento elétrico considerados.

Na secção **4** são apresentados os resultados obtidos através da aplicação da metodologia descrita. São apresentados os resultados do modelo de previsão do funcionamento do ICE e apresentada a estimativa do consumo de bateria dos veículos com base nos valores de VSP instantâneos. Realiza-se também a análise de consumos, emissões e condições dinâmicas aplicando a matriz de funcionamento previamente descrita e a metodologia VSP. Por último, são estimados impactes por distância percorrida e frequência de carregamento, quer ao nível de consumos e emissões, quer ao nível de custos de carregamento e abastecimento.

Na secção **5** encontra-se a conclusão de todo o trabalho desenvolvido, realizando-se uma síntese dos problemas levantados e objetivos propostos. É também feito um sumário dos principais resultados das análises realizadas e das principais conclusões das avaliações de impactes. Os resultados são discutidos de forma crítica e por fim são apresentadas sugestões de melhoria para trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

No capítulo de introdução foi abordado o crescimento do interesse na eletrificação do setor automóvel. Esta dissertação tem como principal objeto de estudo os PHEV, e este capítulo será focado na descrição do funcionamento e da gestão de operação deste tipo de veículos na atualidade.

2.1. Descrição de funcionamento de um PHEV

Um HEV é um automóvel que possui dois tipos de motores: um motor de combustão interna e um ou mais motores elétricos. Estes motores garantem a propulsão do veículo e alternam o seu funcionamento durante a sua deslocação.

Nos finais do século XIX, Ferdinand Porsche ambicionava desenvolver um veículo puramente elétrico. No entanto, devido à fraca autonomia das baterias da época, Porsche necessitou de solucionar o problema com a implementação de um motor auxiliar que alimentasse as mesmas, convertendo a sua criação no primeiro automóvel híbrido da história[13]. O *Mixte* (**Figura 2-1**), que unia um motor de combustão interna cuja rotação alimentava um dínamo que carregava um banco de acumuladores. Esses acumuladores, por sua vez, alimentavam motores elétricos situados nas rodas da frente do veículo. Dessa forma, era o motor elétrico que garantia a propulsão do veículo, sendo que o motor de combustão interna era usado exclusivamente como gerador elétrico[14].



Figura 2-1 - Mixte, o primeiro veículo híbrido [14]

No entanto, foi apenas no final do século XX que os veículos híbridos começaram a ser vistos como uma alternativa viável aos meios de transportes convencionais, muito por conta do aumento da consciencialização ambiental. O primeiro HEV a ser comercializado em maior escala foi o Toyota Prius, em 1997 (**Figura 2-2**).



Figura 2-2 - O primeiro modelo do Toyota Prius, 1997

O carregamento das baterias dos HEV é efetuado apenas durante a condução, havendo uma regeneração da energia através das travagens e desacelerações do automóvel[15]. Sendo a capacidade das baterias dos HEV pequena (tipicamente até 3 kWh [16]), esta é incapaz de providenciar uma grande autonomia elétrica ao veículo.

A evolução dos híbridos levou ao surgimento dos híbridos elétricos plug-in (PHEV), cuja bateria, de maior capacidade, pode ser carregada na rede. Os PHEV são concebidos para substituir completa/parcialmente o uso do motor a combustão pelo uso da potência elétrica fornecida pela bateria e funcionam como uma ponte entre os veículos elétricos (EV) e os HEV, no sentido em que funcionam igualmente com dois tipos de potência e ao mesmo tempo oferecem a hipótese de carregamento na rede [17]. Apesar de ter menor capacidade que uma bateria de um EV, a bateria nos PHEV é relativamente maior face aos HEV (tipicamente até 15 kWh [16]), permitindo maior quilometragem em modo elétrico (normalmente até 65 km [16]).

A geração dos veículos híbridos plug-in teve início apenas no começo deste milénio, quando em 2003 a Renault criou a *Elect'road*, uma adaptação da já existente carrinha *Kangoo* mas com a particularidade de ser um híbrido com a opção de carregamento na rede (**Figura 2-3**)



Figura 2-3 - Renault Kangoo Elect'road (2003), o primeiro PHEV a ser comercializado.

Atualmente os PHEV são ainda bastante dependentes do motor de combustão interna. No entanto, o interesse em veículos capazes de reduzir o consumo de combustíveis fósseis tem vindo a crescer, sendo a autonomia dos PHEV maior com o crescente desenvolvimento das baterias. A utilização deste tipo de veículos permite diminuir a dependência de combustíveis, sobretudo com o aumento das fontes renováveis na rede elétrica[18].

Em termos do modo de funcionamento de um PHEV, este pode funcionar em modo elétrico, em modo combustão ou com os dois motores em simultâneo. Esta flexibilidade da linha de transmissão do automóvel torna a sua arquitetura mais complexa. Os PHEV têm por isso 2 arquiteturas possíveis e que permitem o fornecimento de potência de 2 fontes diferentes: um sistema de propulsão montado em série ou o sistema montado em paralelo[19].

Na **Figura 2-4** encontram-se esquematizados os tipos de arquitetura dos PHEV.

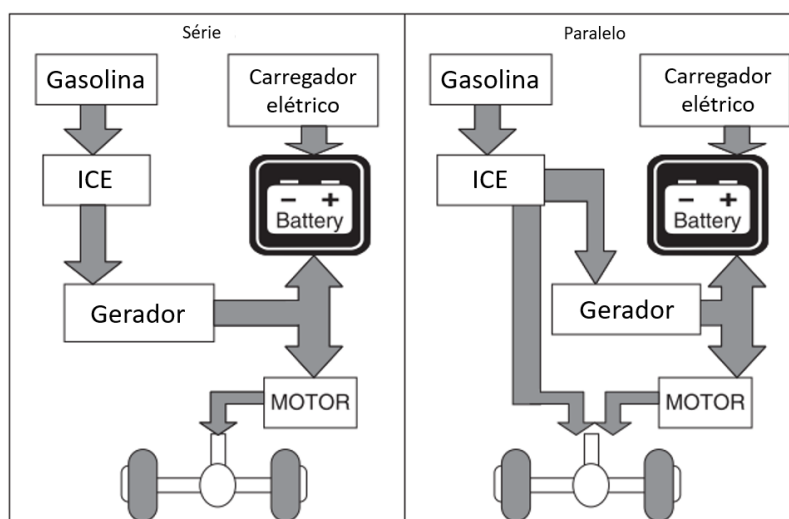





Figura 2-4 - Tipos de arquitetura de PHEV, em série à esquerda e em paralelo à direita (adaptado [19])

Na montagem em série o veículo utiliza como única fonte de propulsão direta o motor elétrico. A bateria é carregada através de uma tomada (carregador elétrico) e por meio do motor térmico, através de um gerador. Já a montagem em paralelo tem a particularidade das suas rodas serem alimentadas diretamente com potência elétrica e térmica. Neste tipo de montagem o motor térmico encontra-se ligado às rodas e simultaneamente gera energia alimentando a bateria e o motor elétrico[19]. Alguns PHEV, como o *Toyota Prius PHEV* possuem uma arquitetura flexível (*power-split*), que lhes permite funcionar tanto em série como em paralelo, também denominado *full hybrid*.

Tabela 2-1 - Exemplos de PHEV com diferentes arquiteturas [20]

Chevrolet Volt – Arquitetura em Série	Honda Civic Hybrid – Arquitetura em Paralelo	Toyota Prius PHEV – Arquitetura <i>Full Hybrid</i>
		

Um PHEV possui 2 modos principais de carga: a depleção de carga (CD - *charge depleting*), onde o estado da carga da bateria (SOC – *state of charge*) decresce de forma contínua, consoante a estratégia de gestão energética do veículo, e a sustentação de carga (CS - *charge sustaining*), em que o SOC atinge um nível onde tende a estabilizar (tipicamente a rondar os 25%), sendo a variação de carga aproximadamente nula[17].

Na **Figura 2-5** está representado o exemplo da evolução do SOC em função da distância percorrida durante os 2 modos de funcionamento de um PHEV.

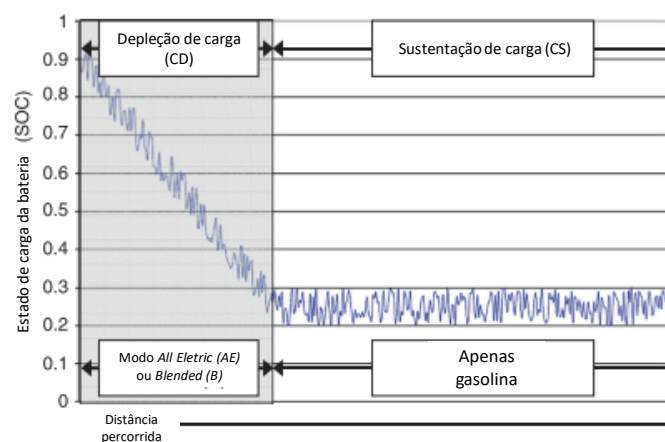


Figura 2-5 - Modos de funcionamento de um PHEV (adaptado de [19])

Assim sendo, quando previamente carregado, o PHEV inicia a sua fase de depleção de carga, na qual a bateria fornece a maior parte da energia para a deslocação do automóvel, havendo uma descida aproximadamente contínua do SOC. Alguns PHEV são concebidos para funcionar em modo 100% elétrico durante o modo de depleção de carga (*all-electric [AE]*), onde a propulsão do veículo é totalmente garantida pela bateria, ou em modo combinado (*blended [B]*), onde a fonte de potência é não só a bateria como também o motor térmico. A descida do nível de carga não é constante e é possível observar algumas oscilações durante o período de depleção de carga, devido à regeneração de carga durante a condução durante as travagens do veículo e devido às condições variáveis de condução que podem levar a um consumo elétrico irregular[19].

Quando o SOC atinge o nível mais baixo, o veículo entra no modo de sustentação de carga, que é o único modo de funcionamento de um híbrido convencional. Durante este modo, a carga da bateria é conservada pela maior preponderância do motor de combustão, funcionando o motor elétrico para aumentar a eficiência e recuperar energia cinética durante a condução. No modo de sustentação de carga observamos também oscilações no SOC, uma vez que a bateria recebe energia do gerador ligado ao motor térmico e através de travagens regenerativas. O veículo permanece no modo de sustentação de carga até ser novamente carregado[19].

A gestão do estado de carga da bateria não é uniforme entre todos os PHEV. Os fabricantes são responsáveis por criar os mecanismos necessários para obter um consumo mais sustentável. Os condutores e as condições de condução têm também um papel ativo na gestão energética dos PHEV, uma vez que para estilos de condução diferentes e percursos com a mesma distância, mas com características díspares, os consumos de combustível podem variar bastante para o mesmo automóvel[21]. O outro fator que pode alterar a eficiência energética de um PHEV é a frequência do carregamento [22].

2.2. Impactes da utilização de um PHEV

É necessário ter em conta vários fatores aquando da opção pela compra de um PHEV. O orçamento, o número de quilómetros diários ou até mesmo as preocupações energéticas e ambientais do utilizador são dados importantes a ter em conta na aquisição deste tipo de veículos[23]. Na maior parte das situações reais, os utilizadores não pretendem ou não têm disponibilidade para adquirir mais do que um veículo (ICEV e EV) o que faz dos PHEV alternativas bastante atraentes aos veículos convencionais e EV.

Quando consideramos o consumo de combustível e as emissões de GEE de um PHEV, as principais variáveis a avaliar são: a gestão de operação elaborada pelo fabricante do automóvel; a frequência dos carregamentos; os ciclos de condução; e a fonte primária de energia, quer do combustível, quer da eletricidade[24].

Apesar de apenas utilizar eletricidade, não tendo emissões associadas e caracterizando-se por uma utilização tipicamente mais eficiente energeticamente, um BEV não permite deslocações de grandes

distâncias entre carregamentos (tipicamente até 400km[25]). Para alguns utilizadores os PHEV são opções mais interessantes que os BEV em situações onde é mais valorizada a questão da autonomia total do veículo [26]. Na **Tabela 2-2** apresentam-se algumas características destes dois tipos de veículos elétricos, permitindo uma melhor comparação dos mesmos.

Tabela 2-2 - BEV vs. PHEV (Comparação)

Veículos elétricos a bateria (BEV)	Veículos híbridos <i>plug-in</i> (PHEV)
<ul style="list-style-type: none"> • Maior autonomia elétricas • Zero emissões • Simplicidade mecânica • Maior eficiência energética 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidade de propulsão • Maior autonomia total • Complexidade mecânica • Melhor desempenho dinâmico

A evolução e desenvolvimento das tecnologias PHEV podem levar a uma diminuição dos custos destes veículos, tornando-os assim uma opção mais válida financeiramente, mas atualmente as tecnologias PHEV são ainda bastante caras. O aumento da capacidade de armazenamento das baterias dos PHEV pode tornar estes veículos ainda mais económicos, porém o aumento do peso do veículo é um fator limitante. Outra adversidade aquando da aquisição de um PHEV por clientes particulares é a ausência de incentivos fiscais para este tipo de veículos, contrariamente ao que acontece com os EV. Os PHEV estão ainda sujeitos a um Imposto Único de Circulação (IUC) iguais a um veículo convencional com a mesma cilindrada[27].

Do ponto de vista ambiental as vantagens dos PHEV não se resumem apenas ao menor consumo energético, mas também à substituição das fontes de propulsão a combustão por fontes de propulsão elétrica. O menor consumo de combustível dos PHEV, aliado ao crescimento da percentagem de energia de fonte renovável na rede elétrica que tem vindo a diminuir as emissões de poluentes (CO₂, NO_x, etc.) por cada kWh de eletricidade produzido[28], faz destes veículos uma solução energética e ecologicamente mais sustentável comparada aos veículos convencionais. No entanto, várias condicionantes devem ser tidas em consideração aquando da análise deste tipo de veículos. Para uma análise correta dos impactes ambientais dos PHEV deverá ser utilizada uma Análise Ciclo de Vida (ACV) do veículo.

A análise de ciclo de vida é uma técnica de avaliação e quantificação dos impactos ambientais de uma determinada atividade ou produto[29]. Uma ACV de um veículo abrange todos os processos desde a extração de matéria prima, passando pela produção do automóvel e da energia, e terminando no fim de vida do automóvel. Esta análise divide-se em duas fases principais. Uma que se inicia na produção de energia (combustível e/ou eletricidade) e termina no consumo por parte do veículo (*Well to Wheel* – WTW), que se divide comumente em duas fases: WTT (*Well to Tank*) – impactes desde a produção até ao armazenamento da energia do veículo; TTW (*Tank to Wheel*) – impactes da conversão interna da energia do veículo em energia mecânica das suas rodas. A outra fase contabiliza os impactos da conceção e posterior deposição e reciclagem do veículo (*Cradle to Grave* – CTG). Com esta análise, é possível obter resultados mais significativos acerca dos impactes ambientais dos vários tipos de

veículos. Uma análise de ciclo de vida de vários tipos de veículos é feita em [6], estando os resultados na **Figura 2-6**.

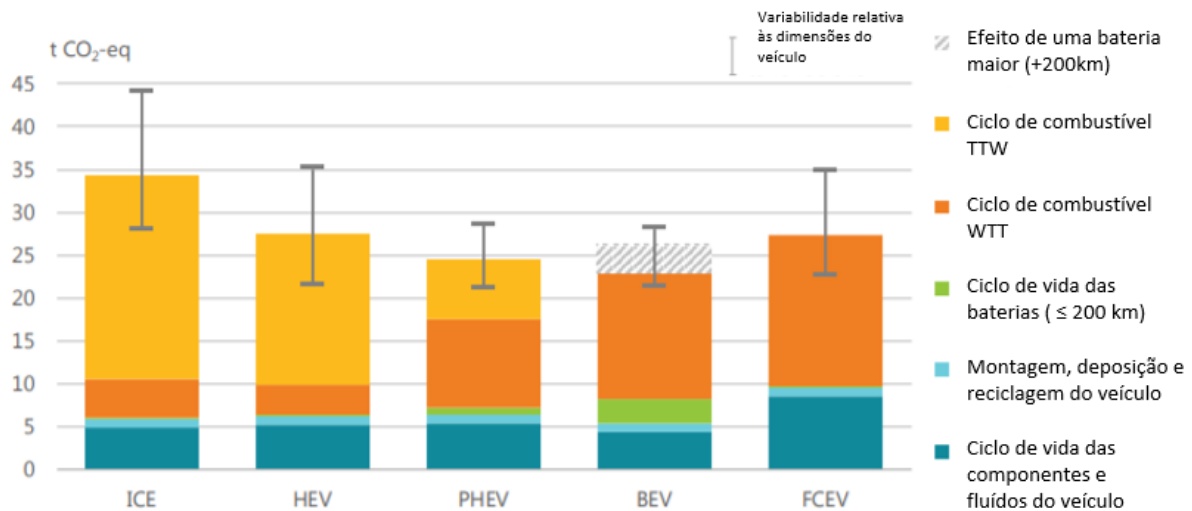


Figura 2-6 – ACV de vários tipos de motorização automóvel na Europa (adaptado de [6]). Cálculos realizados para veículos com performances semelhantes em termos dinâmicos e mecânicos.

Os valores apresentados estão em t CO₂ eq., uma unidade que permite expressar a quantidade de emissões de GEE. Verifica-se que os PHEV são uma das alternativas com menor impacto na emissão de GEE, ficando apenas atrás dos veículos elétricos a bateria (BEV) com menores baterias. Apesar de utilizarem baterias, devido às menores dimensões das mesmas os seus impactos nas emissões de GEE são menores quando comparados com os BEV, quer em termos de ciclo de vida, quer nas emissões WTT. Permitem também uma redução em mais de metade nas emissões TTW face aos HEV e ICEV, devido à menor dependência de combustível.

A análise WTW constata que as emissões de GEE por parte do sector automóvel em circulação reduz, em geral, com a eletrificação dos veículos. Contudo, esta diminuição das emissões está largamente associada à dependência de fontes fósseis na geração de energia para a rede[30]. Para um aproveitamento melhor do potencial de mitigação das emissões de GEE dos veículos com motor elétrico, nos quais se incluem os PHEV, é necessária a introdução de mais energia de fonte renovável, cuja geração seja isenta de poluentes[31].

Pode encontrar-se também em [24] uma análise das fases CTG e WTW de PHEV, analisando as diferenças para as arquiteturas em paralelo e série, considerando ciclos de condução e distâncias diferentes. Nesse estudo, é possível verificar qual o impacto do carregamento dos PHEV nas emissões globais (*Well to Grave* – WTG). Para o veículo estudado e um valor diário de distância percorrida de 20km em CD assume-se que as emissões totais de CO₂ são repartidas em 60% WTW e 40% CTG, tendo em conta um total de 300,000km percorridos durante o tempo de vida do veículo, e 40% WTW e 60% CTG para um total de 150,000km. No caso de a condução durante o tempo de vida do veículo ser feita exclusivamente em CS (sem recarregamento), os valores seriam bem diferentes. Para uma

quilometragem total de 300,000km, 85% das emissões seriam na fase WTW e 15% na fase CTG. Para uma quilometragem de 150,000km, a proporção seria 75% para WTW e 25% para CTG. No caso de uma utilização sempre em CD durante um ciclo de vida com 300,000km as emissões totais de CO₂ seriam de 25 ton e para um ciclo de vida igual, mas uma utilização em CS esse valor seria de 67 ton, valores que comprovam a importância do carregamento dos PHEV na atenuação dos impactos ambientais associados à utilização destes veículos.

2.3. Gestão de operação e otimização de utilização de um PHEV

A gestão de operação (GO) de um veículo corresponde ao delineamento de estratégias que levam a uma mais eficiente e sustentável utilização do mesmo, tendo em conta o seu consumo energético, emissões e desempenho.

Devido à sua arquitetura mais complexa, o estudo da GO dos PHEV é bastante pertinente, sobretudo no contexto da gestão energética e de emissões. Os PHEV têm como principal vantagem face aos veículos convencionais a utilização do apoio elétrico que permite um consumo mais eficiente e a menor custo, no entanto como descrito em 2.1 a partir de um estado de carga base ou quando requisitada uma maior carga durante a CD o motor térmico é ativado alterando de forma significativamente o desempenho energético do veículo.

Em [32] é feita uma caracterização dos modos operacionais de dois PHEV através de uma estimativa do consumo de combustível e eletricidade e emissões, bem como do número de quilómetro em CD para cada ciclo de condução. Este estudo confirma que as condições de condução são fundamentais para o melhor desempenho energético e ambiental do veículo. Para ciclos de condução mais agressivos o PHEV torna-se menos eficiente energeticamente, sendo que para PHEV cuja depleção de carga é feita em modo de mistura existe uma grande dependência do estilo de condução na quantidade de tempo onde o ICE está ou não ativado. É por isso de esperar que para cargas mais elevadas a propulsão do veículo seja apoiada ou totalmente assegurada pelo motor térmico.

O desempenho energético dos PHEV é também bastante dependente do estado de carga da bateria, sendo claramente vantajoso um carregamento frequente. Em [33] é quantificada a diferença no consumo e nas emissões de um veículo de estudo em diferentes gamas de SOC, o que permite verificar a importância do carregamento na utilização de um PHEV. Para viagens que ocorrem entre 50 a 40% de SOC verifica-se que o consumo de combustível do veículo é 57% superior ao consumo médio, sendo as emissões de CO₂, CO, NO_x superiores em 56%, 27% e 55,6% respetivamente. Na gama dos 60 a 50% o consumo e emissões de CO₂ é maior em 9,7%. As vantagens do carregamento dos PHEV não se limitam ao desempenho energético do veículo mas também ao económico, sendo a depleção de carga de um PHEV entre 70-90% mais barata que o funcionamento de um híbrido convencional [24].

Este trabalho irá enriquecer a atual literatura, apresentando uma análise segundo a segundo da operação dos PHEV. A metodologia desenvolvida fornece um modelo de avaliação universal que poderá ser aplicado a todos os PHEV e que permite uma comparação entre veículos mais completa

que os habituais dados fornecidos pelos fabricantes, através de uma matriz de funcionamento que permitiu organizar cada instante da viagem consoante os motores em propulsão em cada instante. Através da informação recolhida irão ser estudados os impactes financeiros, energéticos e ambientais da frequência de carregamento e nos quilómetros percorridos pelos utilizadores

3. Metodologia

No decorrer do trabalho foi necessário desenvolver uma metodologia para estudar o funcionamento dos PHEV. A análise deste tipo de veículos é diferente comparativamente aos veículos convencionais devido à maior complexidade do seu sistema de propulsão, que permite uma grande variedade zonas de funcionamento.

A **Figura 3-1** esquematiza o processo metodológico seguido, desde a recolha de dados (amarelo), o tratamento de dados (a azul), criação de modelos (laranja) até à avaliação dos resultados (verde). Cada um dos processos mencionados serão explicados nos seguintes capítulos em maior detalhe.

Os dados de cada viagem utilizados no trabalho já se encontravam recolhidos, tendo sido obtidos através de um laboratório portátil. Parâmetros como aceleração, declive, velocidade, emissões de escape e estado de carga da bateria são obrigatórios para a caracterização dos PHEV em termos energéticos e de impactes ambientais associados. Durante as viagens realizadas com os automóveis estudados foram recolhidos dados de diferentes condições de condução para uma caracterização mais completa de todo o espectro de potência de cada veículo. Foram adquiridos dados dinâmicos (aceleração, velocidade, VSP), dados associados à energia e ambiente (consumos e emissões), dados climatéricos e topográficos (temperatura ambiente, declive) bem como o estado de carga da bateria instantâneo. Todos os parâmetros recolhidos foram registados em *Excel*.

Quer os dados recolhidos, quer a avaliação de impactes dos veículos estudados foram realizados à frequência de 1 Hz, permitindo uma avaliação mais completa e detalhada, quando comparada com as muitas avaliações globais encontradas na literatura acerca dos PHEV (**Figura 3-2**). Devido à maior complexidade dos PHEV a análise de impactes na escala temporal segundo a segundo é um desafio maior quando comparado com os veículos convencionais ou elétricos, devido à alternância dos meios de propulsão. No entanto, ao diminuir a escala na avaliação do desempenho destes automóveis, pode estudar-se com mais detalhe as suas particularidades e definir estratégias de otimização na sua utilização.

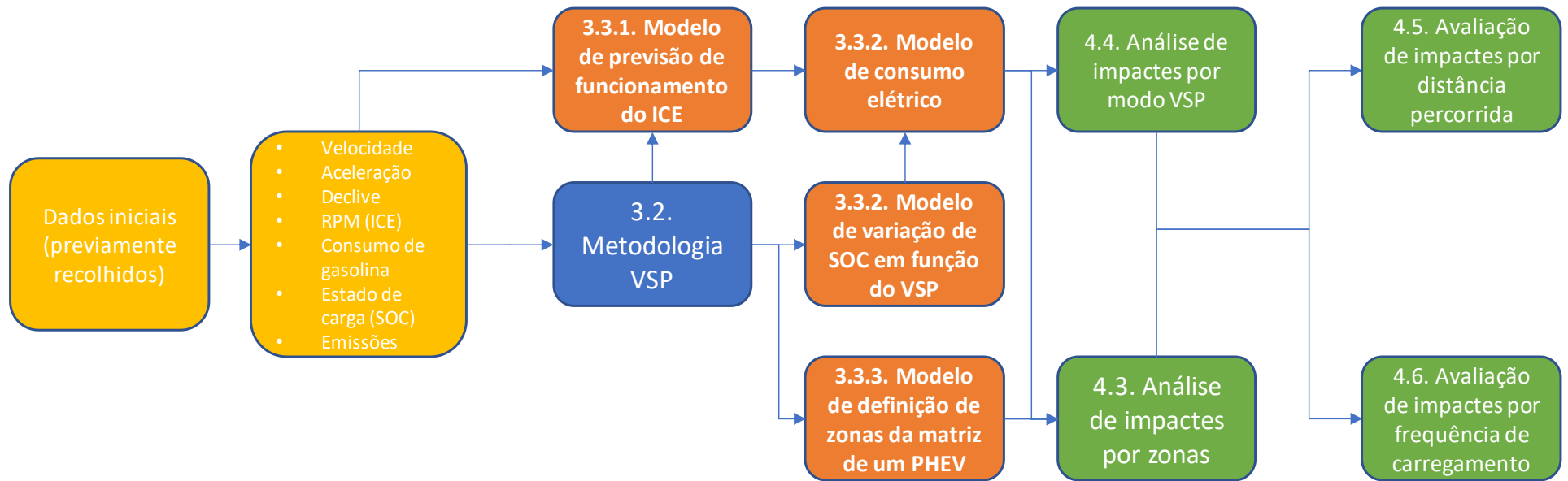


Figura 3-1 - Esquema metodológico

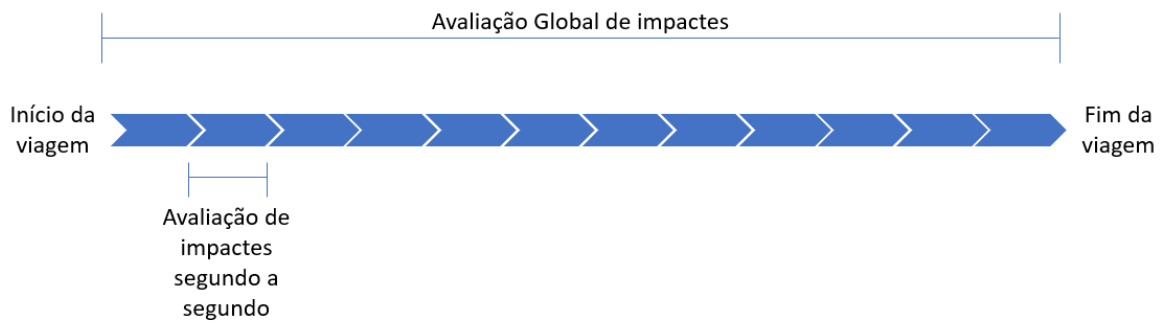


Figura 3-2 - Avaliação Global vs. Avaliação Segundo a Segundo

Após a recolha de cada parâmetro segundo a segundo, realizou-se uma análise de dados subsequente utilizando a metodologia VSP. Esta metodologia consiste em agrupar pontos de potência semelhante de forma a caracterizar cada modo com o respetivo consumo, emissão, etc., e será descrita na secção **3.2**.

Uma vez que as intercalações dos modos de propulsão do veículo são de grande importância quando da GO de um PHEV foi criado um modelo que previa a ativação do ICE através de características dinâmicas da viagem. Esse modelo encontra-se descrito em maior detalhe em **3.3.1**.

O consumo elétrico dos PHEV é também de extrema importância devido à capacidade destes veículos dependerem apenas do seu motor elétrico durante longos períodos. Por essa razão, e porque a medição direta de consumos instantâneos neste tipo de veículos tem um elevado grau de risco devido às altas correntes e voltagens, foi necessário desenvolver uma metodologia que medisse indiretamente o consumo elétrico instantâneo dos veículos com base nas condições dinâmicas de condução. A metodologia teve por base o consumo instantâneo de bateria do automóvel durante a fase de depleção de carga, onde o consumo elétrico é preponderante, e será explicada em **3.3.2**.

Devido à existência de dois meios de propulsão distintos desenvolveu-se também uma matriz de funcionamento que pode ser aplicada a qualquer PHEV. Essa matriz pretende dividir cada instante da viagem tendo como referência os motores em funcionamento. A matriz e a sua aplicação encontram-se descritos em **3.3.3**.

3.1. Veículos e viagens monitorizadas

3.1.1. Descrição das viagens

Foram utilizados dados de duas viagens para cada veículo, perfazendo um total de quatro viagens. O trajeto foi semelhante em todas as viagens realizadas, de modo a obter um melhor termo de comparação entre os dois veículos e uma visão abrangente dos mecanismos de gestão energética dos veículos face a diferentes condições de condução.

O percurso das viagens dividiu-se entre dois trechos de diferentes características. Um percurso urbano, onde se pretendia ver o comportamento do veículo em condições de condução citadinas, com menor velocidade e maior incidência de momentos de arranque e paragem, e uma fase de autoestrada que permitiu estudar o comportamento dos automóveis em situações de alta velocidade.

Devido às diferentes condições de condução e à diferente arquitetura de cada veículo, o tempo de cada viagem foi inevitavelmente diferente, bem como a correspondente quilometragem. Dessa forma, é importante ter em consideração a diferente duração dos períodos de depleção de carga em cada viagem, bem como os quilómetros percorridos em cada modo de funcionamento.

Todas as viagens foram iniciadas com os veículos totalmente carregados, havendo um consumo de bateria desde o nível mais alto de SOC até ao nível de sustentação de carga. Isto permitiu uma melhor comparação e avaliação de ambos os modos do veículo, depleção e sustentação de carga.

As principais características das 4 viagens realizadas estão compiladas na **Tabela 3-1**.

Tabela 3-1 - Características das viagens realizadas pelos veículos A e B

		Distância total percorrida (km)	Velocidade média (km/h)	Aceleração média (m/s ²)	Tempo total (min)
Veículo A	Viagem 1	92	46.9	1.276×10^{-3}	118
	Viagem 2	122	59.3	6.750×10^{-3}	126
Veículo B	Viagem 1	94	52.9	-2.962×10^{-3}	107
	Viagem 2	96	55.9	-2.258×10^{-3}	103

3.1.2. Veículos utilizados

Durante este trabalho foram utilizados dois veículos de teste: um com características mais traçadas para um desempenho desportivo e mais focado na agilidade e velocidade, mas com um consumo energético menos otimizado, outro com uma arquitetura mais económica com o objetivo de minimizar o consumo energético. Na **Tabela 3-2** é possível encontrar as principais características de ambos os automóveis.

Tabela 3-2 - Informações sobre os veículos analisados, [20],[34]

Veículo A	Veículo B
<p>Lançamento: abril de 2017</p> <p>Preço base: 39,350€</p> <p><u>Componente Elétrica:</u></p> <p>Capacidade da bateria (utilizável estimado): 7.6 (6.5) kWh</p> <p>Carregamento completo (100% da carga): 2h15 a 3.7 kW</p> <p>Autonomia elétrica (dados do fabricante): 56-57 km</p> <p>Autonomia elétrica (estimativa EVDB): 26 km</p> <p>Potência: 65 kW (87 hp)</p> <p>Binário: 165 Nm</p> <p><u>Componente de combustão:</u></p> <p>Motor: 1.5L, 3 cilindros com tecnologia turbo</p> <p>Potência: 100 kW (136 hp)</p> <p>Binário: 220 Nm</p> <p>Combustível: gasolina</p> <p><u>Informações gerais:</u></p> <p>Peso: 1,635 kg</p> <p>0 aos 100 km/h: 6.8 segundos</p> <p>Velocidade máxima (modo elétrico): 125 km/h</p> <p>Velocidade máxima: 200 km/h</p> <p>Potência total: 165 kW</p> <p>Consumo gasolina:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 25 km – 0 l/100 km • 50 km – 3.17 l/ 100 km • 100 km - 5.54 l/ 100 km 	<p>Lançamento: maio de 2017</p> <p>Preço base: 40,780€</p> <p><u>Componente Elétrica:</u></p> <p>Capacidade de bateria (utilizável estimada): 8.8 (7.0) kWh</p> <p>Carregamento completo (100% da carga): 2h15 a 3.7 kW</p> <p>Autonomia elétrica (dados do fabricante): 62-63 km</p> <p>Autonomia elétrica (estimativa EVDB): 40 km</p> <p>Potência: 53 kW (71hp)</p> <p>Binário: 163 Nm</p> <p><u>Componente de combustão:</u></p> <p>Motor: 1.8L, 4 cilindros</p> <p>Potência: 71 kW (96hp)</p> <p>Binário: 142 Nm</p> <p>Combustível: gasolina</p> <p><u>Informações gerais:</u></p> <p>Peso: 1,530 kg</p> <p>0 aos 100 km/h: 11.8 segundos</p> <p>Velocidade máxima (modo elétrico): n/a</p> <p>Velocidade máxima: 160 km/h</p> <p>Potência: 91 kW</p> <p>Consumo gasolina:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 25 km – 0 l/100 km • 50 km – 0.796 l/ 100 km • 100 km – 2.30 l/ 100 km

Todos os valores presentes na **Tabela 3-2**, foram retirados de [20], [34] e também dos livretes de cada automóvel.

Os valores de autonomia estimados são alcançados quando as baterias dos veículos se encontram completamente carregadas. A autonomia real irá variar mediante fatores como o clima, topografia e tipo de terreno, uso de ar condicionado e estilo de condução. Em ambos os veículos em modo CD o consumo é essencialmente elétrico, podendo o motor térmico funcionar quando a carga é elevada[35].

O **veículo A** possui características que permitem oferecer ao condutor uma condução mais desportiva, quando comparado com o **veículo B**, sendo os seus motores (ICE e EM) mais potentes. O consumo real de eletricidade varia entre 174 Wh/km e os 590 Wh/km para o **veículo A** e os 124 Wh/km e os 255 Wh/km para o **veículo B**, consoante as condições climatéricas e de condução de ambos os veículos[35].

3.2. Metodologia Vehicle Specific Power

A metodologia *Vehicle Specific Power* (VSP) consiste num modelo que utiliza simplificações das forças aplicadas ao veículo, de maneira a efetuar uma caracterização ambiental e energética do mesmo, com base em dados medidos durante a condução[36]. A análise VSP permite obter uma estimativa da potência por unidade de massa (W/kg) através da combinação de elementos dinâmicos (velocidade, aceleração, resistência do pavimento e do ar, etc.) e do declive da estrada[37]. A cada ponto da viagem, o valor de VSP correspondente é calculado através da **equação 3.2.1**:

$$VSP = v \times (1.1 \times a + 9.81 \times \text{declive} + 0.132) + 3.02 \times 10^{-4} \times v^3 \quad (3.2.1)$$

Onde “v” corresponde à velocidade (m/s), “a” corresponde à aceleração do veículo (m/s²) e o declive corresponde ao ângulo entre a superfície e a horizontal.

Na análise VSP usualmente é feito um agrupamento dos pontos em intervalos de potência por unidade de massa requerida semelhantes. Usualmente, para veículos ligeiros, a metodologia VSP é dividida em 14 modos[37]. Na **Tabela 3-3** encontra-se os intervalos de valores de VSP correspondente a cada um desses 14 modos.

Tabela 3-3 - Modos do VSP (adaptado de [38])

Modo VSP	Intervalo (W/kg)	Modo VSP	Intervalo (W/kg)
1	$VSP < -2$	8	$13 \leq VSP < 16$
2	$-2 \leq VSP < 0$	9	$16 \leq VSP < 19$
3	$0 \leq VSP < 1$	10	$19 \leq VSP < 23$
4	$1 \leq VSP < 4$	11	$23 \leq VSP < 28$
5	$4 \leq VSP < 7$	12	$28 \leq VSP < 33$
6	$7 \leq VSP < 10$	13	$33 \leq VSP < 39$
7	$10 \leq VSP < 13$	14	$39 \leq VSP$

O VSP está muitas vezes associado a análises correlativas, como o consumo elétrico em função do valor instantâneo de VSP. Na **Figura 3-3** encontra-se um exemplo de um consumo energético de um ICEV e um EV.

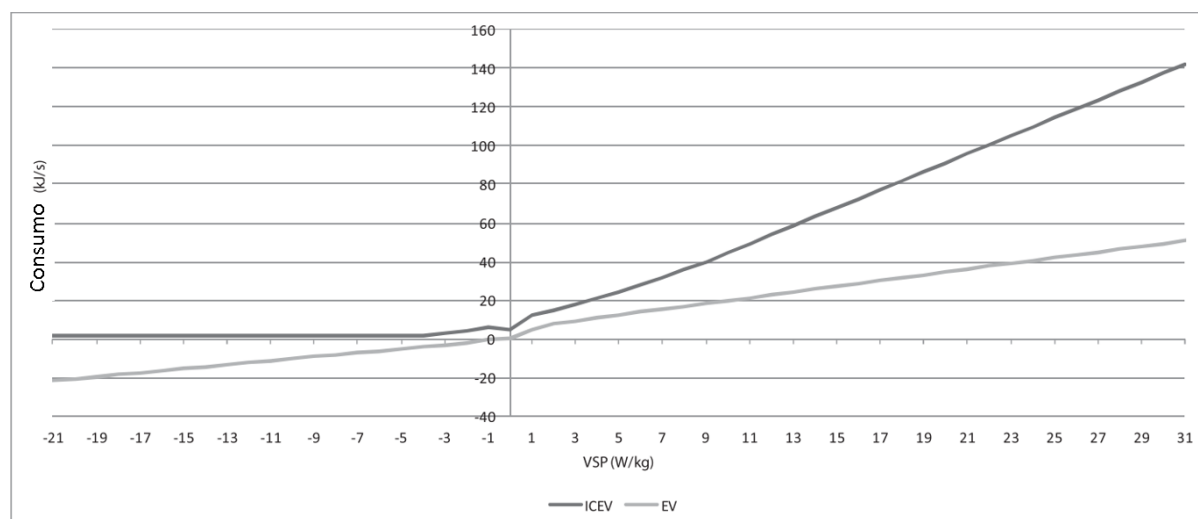


Figura 3-3 - Exemplo do consumo de combustível em função do valor de VSP (adaptado de [39])

É possível verificar a maior eficiência do veículo elétrico em toda a gama de valores de VSP, sendo mais elevada para VSP maiores. Verifica-se também que para VSP negativos ocorre a regeneração energética, associada às travagens do automóvel. Na **Figura 3-4** está representada a distribuição temporal dos modos VSP durante um ciclo de condução em contexto urbano[39]:

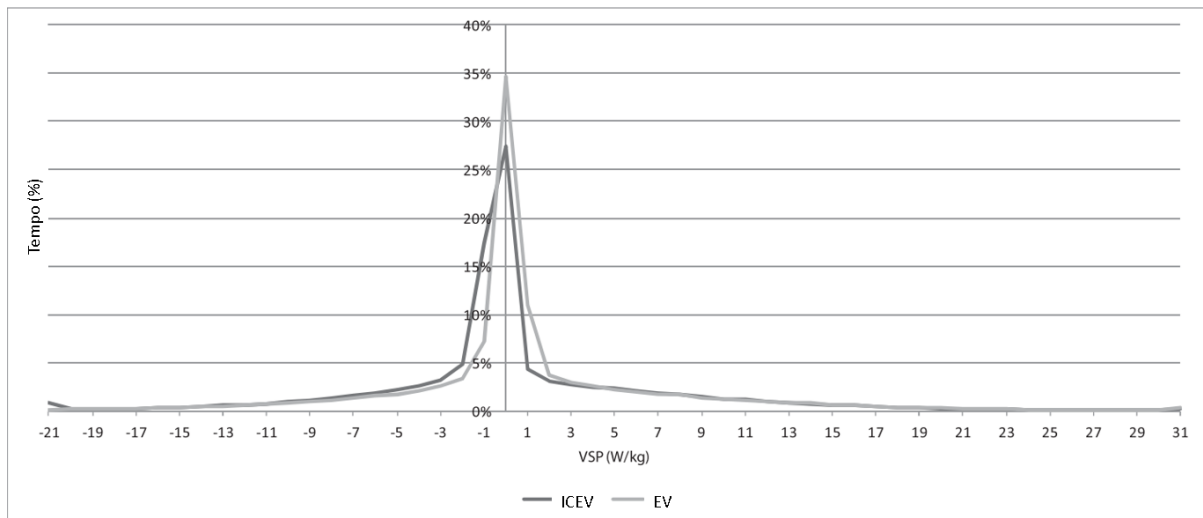


Figura 3-4 - Distribuição temporal dos valores de VSP em condução urbana(adaptado [39])

3.3. Desenvolvimento de modelos

Atualmente existe ainda uma reduzida bibliografia no que toca à análise segundo a segundo dos impactes da condução de PHEV. Na metodologia aplicada neste trabalho procurou-se colmatar essa lacuna, tendo sido criados modelos que permitem uma nova abordagem aos PHEV, que serão descritos nos capítulos seguintes.

3.3.1. Modelo de previsão de funcionamento do ICE

Para reduzir o consumo global de energia é desejável que a propulsão do veículo seja maioritariamente assegurada pelo motor elétrico durante a fase CD. No entanto, durante uma viagem real poderão existir momentos onde a potência exigida ao motor elétrico seja demasiado elevada para que o mesmo assegure a movimentação do veículo. Dessa forma, cada fabricante define as suas estratégias de gestão energética consoante um objetivo final (performance, economia ou ambos), definindo quais os parâmetros dinâmicos que levam à ativação do ICE. O ICE durante a fase CD poderá funcionar como apoio ou em alguns instantes como substituto ao EM.

Compreender as condições dinâmicas que levam à ativação do ICE é por isso de grande importância para uma utilização otimizada de um PHEV. O modelo desenvolvido foi criado com o objetivo de identificar os possíveis parâmetros que poderão levar à ativação do ICE em CD para os dois veículos de estudo. Para a elaboração deste modelo foi feita uma observação dos parâmetros dinâmicos recolhidos (VSP) de onde se procurou verificar correlações entre as condições de condução em cada instante ou intervalo de tempo e a ativação do ICE ($RPM > 0$). O objetivo principal foi criar um conjunto de regras que pudesse ser utilizado universalmente, para qualquer PHEV, com a maior precisão possível, sendo isso uma das maiores inovações do trabalho realizado, dado a pouca informação encontrada nesse campo. Durante a elaboração do modelo foi possível verificar que os mecanismos que levam à ativação do ICE de um PHEV têm em conta não só a carga instantânea como os últimos

segundos da viagem, sendo por isso uma demanda elevada constante de potência o principal mecanismo de ativação do ICE e não tanto uma aceleração muito elevada e súbita.

Na **Figura 3-5** encontram-se os parâmetros que permitem a previsão da ativação e desativação do ICE. O modelo foi aplicado para o veículo A e B, sendo possível aplicá-lo a qualquer outro PHEV em CD.

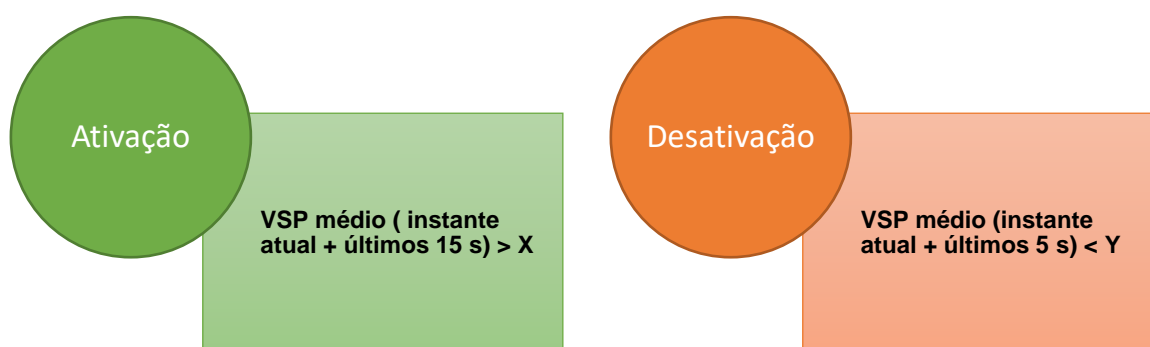


Figura 3-5 - Parâmetros ativação/desativação para um PHEV (Modelo previsão funcionamento do ICE)

É possível verificar na **Figura 3-5** que a ativação do motor térmico tem em conta não só o instante atual como os 15 segundos antecedentes. No entanto, a desativação tem apenas em consideração o instante inicial e os 5 segundos antecedentes. Os valores X e Y são valores genéricos, e consoante a programação de cada PHEV e através da análise dos dados das suas viagens, pode definir-se o seu valor real, que permite uma maior aproximação do modelo ao real funcionamento do ICE em cada viagem. Consoante a arquitetura e características de cada veículo será de esperar uma diferente gestão do ICE durante o modo de depleção de carga, o que se reflete num valor X e Y diferente.

3.3.2. Modelo de variação de SOC em função de VSP e Modelo de consumo elétrico

A análise das quatro viagens foi feita separando as fases de CD e CS, de modo a verificar o perfil de consumo de bateria de ambos os veículos e procurando descobrir os gatilhos que levam à ativação/desativação do motor elétrico. As viagens foram iniciadas com as baterias totalmente carregadas, havendo durante a viagem o consumo de bateria até ao SOC de sustentação.

Uma vez que não havia acesso a dados reais de consumo elétrico instantâneo, foi desenvolvido um modelo que permitisse calcular o consumo de bateria de ambos os veículos durante a fase de CD. A metodologia desenvolvida foi baseada nas condições dinâmicas (VSP), nas condições mecânicas

(Motor térmico [ICE] *on/off*) e no SOC da bateria durante um dado período, o que permitiu a estimativa do consumo elétrico sem efetuar medições diretas.

Ao analisar a variação de SOC associando-a ao valor médio de VSP foi feita a caracterização do consumo de bateria. Dividindo a variação do SOC pelo intervalo de tempo em que ocorre, é possível obter um consumo real de bateria por segundo (% Δ SOC/s) para um VSP médio. Se se aplicar isto para vários instantes e diferentes condições de condução do veículo é possível caracterizar o consumo de bateria num maior espectro de VSP. Combinando o consumo instantâneo de bateria com o VSP instantâneo pode obter-se a relação como se pode observar na **Figura 3-6** retirada de [32].

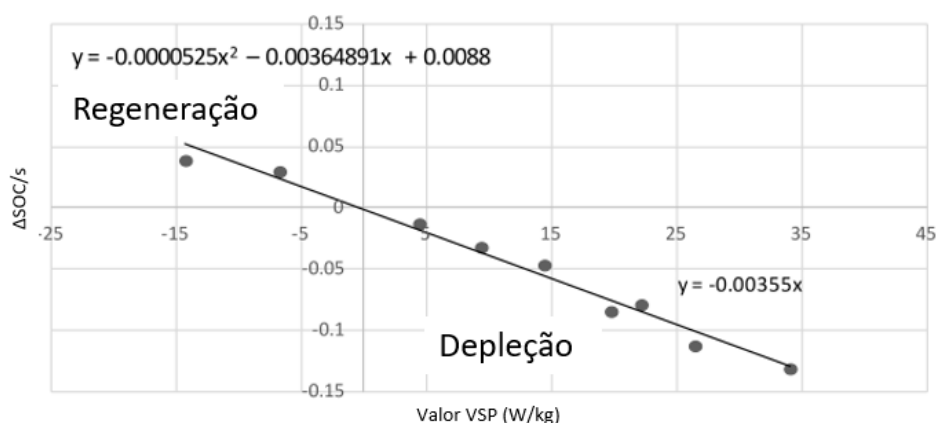


Figura 3-6 - Modelo variação instantânea de SOC em função do VSP (adaptado [32])

Na **Figura 3-6** encontram-se os pontos onde ocorreu regeneração (VSP com valores negativos) e pontos onde ocorreu consumo de bateria (VSP com valores positivos). Para os veículos estudados, o consumo de bateria em função do VSP segue uma tendência quadrática, sendo o consumo tanto maior quanto o valor instantâneo de VSP. Sabendo a capacidade da bateria utilizável de cada veículo é possível obter uma estimativa do valor do consumo elétrico instantâneo, correlacionando a variação de SOC com a energia consumida.

3.3.3. Definição das zonas de funcionamento de um PHEV

A fase de depleção de carga de um PHEV é bastante complexa devido às possíveis combinações de motores na propulsão do veículo. Contrariamente aos veículos convencionais e elétricos, que possuem apenas um meio de propulsão, os PHEV possuem a possibilidade de alternar a sua fonte propulsora enquanto se encontram carregados. Para se caracterizar o funcionamento dos veículos estudados tendo em conta a fonte de propulsão a cada instante de condução foi desenvolvida uma matriz. Essa matriz permite identificar 5 zonas tendo como índices os dois tipos de propulsão possíveis (motor de combustão interna [ICE], motor elétrico [EM]). Isto permite uma análise mais detalhada dos impactos de um PHEV a nível instantâneo, diminuindo a escala da avaliação, oferecendo assim uma alternativa aos estudos de GO que avaliam desempenho energético dos PHEV numa escala temporal global.

Na **Tabela 3-4**, encontra-se representada a matriz de funcionamento, sendo que os índices definidos por 0 representam o respetivo motor desativado, por 1 representam o motor ativado e, para o caso exclusivo do motor elétrico, -1 representa o motor elétrico em regeneração de energia. Dessa forma, pode assumir-se:

- **Zona A:** Zona de regeneração (travagem ou desaceleração) - EM ativado como gerador e ICE desativado.
- **Zona B:** Zona de regeneração (travagem ou desaceleração) com motor térmico em funcionamento – EM ativado como gerador e ICE ativado.
- **Zona C:** Zona de propulsão totalmente térmica – EM desativado e ICE ativado.
- **Zona D:** Zona de propulsão totalmente elétrica – EM ativado e ICE desativado.
- **Zona E:** Zona de propulsão mista – EM ativado e ICE desativado.

Tabela 3-4 - Matriz de zonas de funcionamento de PHEV

		ICE	
		0	1
EM	-1	A	B
	0	-	C
	1	D	E

Com esta matriz pretende-se enquadrar os instantes onde o veículo se encontra em movimento, não sendo dessa forma considerados instantes de propulsão nula, onde ambos os motores se encontram desativados.

Adaptando a **Tabela 3-4** aos dados recolhidos das viagens, assume-se que quando as rotações por minuto (RPM) do ICE são diferentes de 0 a propulsão é totalmente ou parcialmente assegurada pela combustão (ICE = 1; Zona B,C e E). Quando as RPM são nulas, o veículo desloca-se de forma totalmente elétrica (ICE = 0; Zona A e D). No caso do motor elétrico (EM), assume-se que funciona como motor quando há uma aceleração positiva (VSP positivo) (EM = 1), e como gerador quando há uma desaceleração (VSP negativo), gerando energia que irá ser armazenada na bateria (EM = -1). Para instantes onde o consumo de combustível é próximo do consumo de combustível em regime de CS, assume-se que a propulsão do veículo é totalmente assegurada pelo ICE, assumindo-se o EM desativado (EM = 0).

3.4. Descrição das análises realizadas

Com a aplicação dos modelos foi possível realizar análises de dados que permitiram uma compreensão mais abrangente das GO dos veículos estudados. Com as análises realizadas foi possível agrupar amostras de dados instantâneos, sendo dessa forma possível caracterizar de forma mais precisa o funcionamento de cada veículo, recorrendo ao cruzamento dos dados disponíveis e encontrando padrões.

Foram realizadas dois tipos de análise de diferentes espetros: uma análise por zona de funcionamento, onde se recorreu à matriz obtida através do modelo descrito em 3.3.3 e onde se agrupou os dados de cada instante em cada um das 5 zonas de funcionamento, e uma análise por modo VSP, recorrendo à metodologia descrita em 3.2 onde a amostragem foi agrupada por cada um dos 14 modos VSP.

Para algumas das análises realizadas nos veículos foram calculados intervalos de confiança de 95% representados graficamente sob forma de barras de erro, assumindo uma distribuição *t-student*.

3.5. Descrição das avaliações de impactes por distância percorrida e por frequência de carregamento

Após os dados obtidos através dos modelos aplicados e das posteriores análises foram realizadas avaliações de impactes de ambos os veículos, bem como a sua comparação com um veículo convencional. As avaliações tiveram como base os valores médios dos dados inicialmente recolhidos nas duas viagens realizadas por cada automóvel.

As avaliações de impactes tiveram como base dois fatores: Distância total percorrida e frequência de carregamento. Em ambas as avaliações assumiu-se que o veículo iniciou a viagem completamente carregado. Com as avaliações foi possível verificar quais as principais vantagens e desvantagens na opção por cada um dos veículos estudados, bem como sua comparação com um veículo convencional.

3.5.1. Carregamento elétrico: Opções consideradas

Na avaliação de impactes da frequência de carregamento foi considerado o custo associado à eletricidade consumida tendo sido por isso consideradas duas modalidades de carregamento.

Do ponto de vista do carregamento elétrico existem várias opções ao dispor do utilizador de um veículo elétrico. Cada opção apresenta diferentes custos que podem variar bastante consoante o acesso do utilizador a postos de carregamento. Atualmente, ainda é possível encontrar locais públicos onde o carregamento é gratuito, para além das empresas que providenciam os seus próprios postos de carregamento aos seus trabalhadores. No entanto, a partir de 2019 os postos de carregamento rápido outrora gratuitos passaram a ser cobrados com preços e taxas que variam consoante o operador [40]. Para além disso, existe a opção de instalar um carregador nas habitações dos utilizadores[41]. Para o cálculo do custo do carregamento foram tidos como exemplo duas opções: Carregamento Rápido, tendo como base os valores tabelados de um posto de carregamento numa bomba de gasolina na área

de Lisboa; Carregamento Lento, contabilizando o preço médio da eletricidade por kWh em Portugal. De notar que estes valores são meramente ilustrativos e podem variar consoante a acessibilidade do utilizador a diferentes tipos de carregamento.

Para os postos de carregamento rápido o preço de carregamento é definido pela **equação 4.6.1**:

$$\begin{aligned} \text{custo}_{\text{carregamento}} = & \text{Operador de Posto de Carregamento (OPC)} \\ & + \text{Comercializador de Energia para a Mobilidade Elétrica (CEME)} \quad (4.6.1) \\ & + \text{Taxas} \end{aligned}$$

A parcela OPC de **3.2.1** corresponde aos preços praticados pelo posto de carregamento que variam de operador para operador, sendo que esses preços podem ser aplicados em duas diferentes modalidades [40]:

- **Preço inicial de utilização + Preço por kWh consumido** – O OPC estabelece uma tarifa inicial de utilização e cobra também um preço por cada kWh consumido
- **Preço por tempo de utilização** – OPC define um custo por cada minuto de utilização do carregador

Para além dos custos do OPC são ainda contabilizados os custos de energia pagos ao CEME, sendo esses custos semelhantes aos custos de eletricidade cobrados na rede de baixa tensão normal (BTN). Para além disto são aplicadas as respetivas taxas, como o Imposto de Valor Acrescentado (IVA) de 23% e o Imposto Especial ao Consumo de Energia Elétrica (IEC) de 0.001€/kWh[42].

Para a simulação de custo de carregamento teve-se como base os valores de uma Estação de serviço na via 2ª circular - Sul/Norte que tem como OPC e CEME a EDP. Os valores tabelados dos custos estão representados na tabela:

Tabela 3-5 - Preço de carregamento rápido (Estação de Serviço Repsol 2ª Circular - Sul/Norte)[41],[40]

OPC		CEME	Taxas	
Preço p/carregamento	Preço p/kWh	Preço p/kWh	IVA	IEC (€/kWh)
0.15 €	0.09 €	0.21 €	23%	0.001 €

Para o carregamento lento, realizado em casa apenas foi considerado o custo médio da eletricidade por kWh em Portugal (0.2150 €/kWh [43]). Custos de potência contratada e de instalação do carregador não foram considerados.

4. Resultados e discussão

Aplicando a metodologia descrita em 3 foi possível obter os resultados de cada uma das 4 viagens realizadas.

4.1. Previsão de funcionamento de ICE

Da aplicação do modelo descrito em 3.3.1 foi possível definir condições de ativação do ICE que permitissem obter uma maior aproximação da previsão do modelo com os dados reais de funcionamento do ICE.

Tendo o **Veículo A** uma arquitetura e especificações mais desportivas será de esperar que a ativação do motor térmico seja feita em mais instantes quando comparado com o **Veículo B**. Após a observação detalhada da fase de CD para ambas as viagens do **Veículo A** e do **Veículo B** foi possível descobrir os parâmetros que se adequam melhor na descrição do funcionamento do ICE (X e Y da **Figura 3-5**), estando esses valores compilados na **Tabela 4-1**.

Tabela 4-1 - Parâmetros para modelo de funcionamento do ICE - Veículo A e Veículo B

	Veículo A - VSP (W/kg)	Veículo B - VSP (W/kg)
X	20.8	24.0
Y	-9.0	-15.0

Constata-se que para o **Veículo A**, as condições de ativação são menos restritas, sendo necessárias potências menores para o ICE iniciar o seu funcionamento. No entanto, o **Veículo B** promove um funcionamento mais constante do ICE, com pouca intermitência entre a ativação e desativação do mesmo, sendo por isso de prever menos períodos de funcionamento do ICE durante a fase CD mas após a ativação será de esperar períodos de funcionamento um pouco mais duradouros, face aos do **veículo A**. É de assinalar ainda que sendo o **veículo B** mais direcionado para um desempenho mais económico notou-se uma clara diferença na gestão do motor consoante o SOC. Verificou-se que o ICE apenas foi ativado em ambas as viagens quando a bateria se encontrava a baixo dos 35%. Já o **veículo A** apresenta uma gestão de motor semelhante para toda a fase CD.

Os resultados da aplicação do modelo para o **veículo A** encontram-se na **Figura 4-1**.

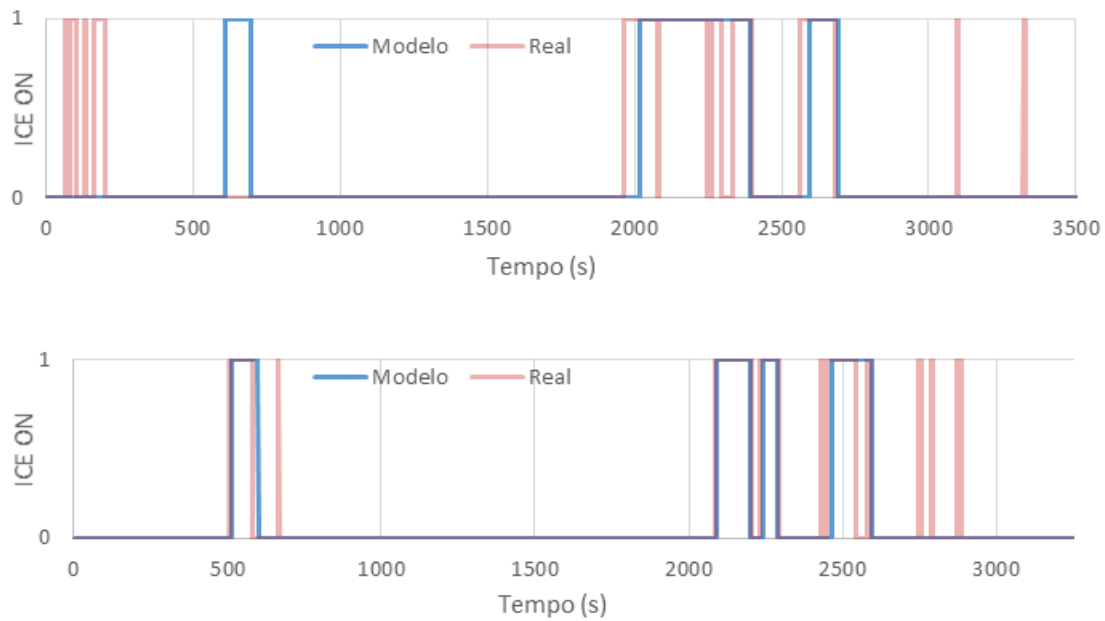


Figura 4-1 - Previsão de funcionamento do ICE (Veículo A): a) (em cima) Viagem 1; b) (em baixo) Viagem 2

Na **Figura 4-1** pode-se verificar que o modelo prevê com uma aproximação razoável a realidade do funcionamento do ICE no **veículo A**. De uma forma global, o modelo prevê corretamente cerca de 93% dos instantes, detetando 73% dos instantes onde o ICE se encontra ligado em condições reais. Na primeira é possível denotar que ocorreu durante uns instantes uma ativação do ICE que não foi identificada com o modelo. Na fase inicial da primeira viagem ocorreram sucessivas ativações do ICE que não foram identificadas pelo modelo, o que pode ser justificado por uma maior previsão do comportamento do ICE durante o arranque. A **Figura 4-2** corresponde aos dados do **veículo B**.

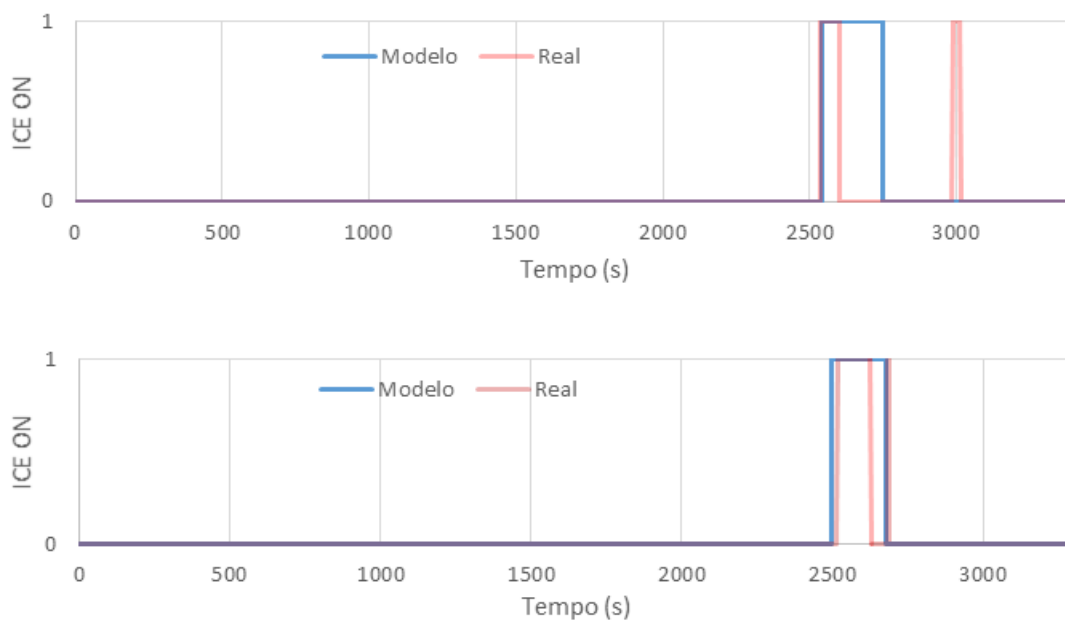


Figura 4-2 - Previsão de funcionamento do ICE (Veículo B): a) Viagem 1; b) Viagem 2

Como se pode observar na **Figura 4-2**, o **veículo B** tem uma menor dependência da fonte térmica durante a fase CD, sendo o tempo de ativação do ICE bastante menor quando comparado com o **veículo A**. O modelo conseguiu prever com alguma precisão o real funcionamento do ICE no veículo B. O modelo conseguiu prever de forma correta o funcionamento da viatura cerca de 95% do tempo total de ambas as viagens, conseguindo prever em 81% dos instantes onde o motor se encontra ativado.

4.2. Curva de SOC

Do modelo descrito em **3.3.2** obtiveram-se estimativas de variação instantânea de SOC em função do valor de VSP. Através dos dados das duas viagens para cada automóvel obteve-se uma curva onde se procurava caracterizar de uma forma precisa a evolução do SOC durante a fase de depleção de carga.

Veículo A

Para o **veículo A**, recorrendo aos dados de ambas as viagens obteve-se os resultados ilustrados na **Figura 4-3**.

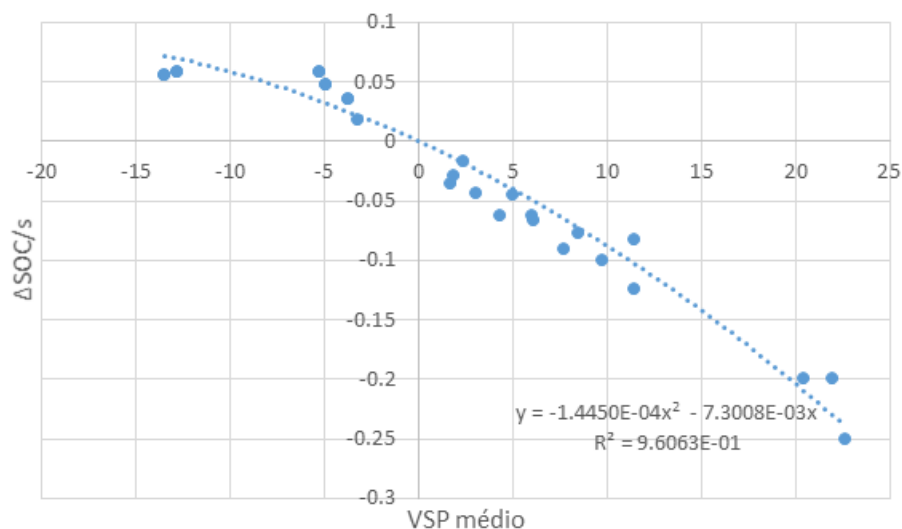


Figura 4-3 - Curva estimativa de consumo de SOC em função de VSP – veículo A

A curva obtida através da correlação dos vários pontos retirados dos dados de ambas as viagens corresponde a uma aproximação bastante satisfatória da realidade ($R^2 > 0.95$). Pode verificar-se que durante a regeneração existe um limite próximo de $\Delta SOC = + 0.05\%$, correspondente ao valor máximo de regeneração que se pode obter numa travagem, como explicado na secção **2.1**. Por outro lado, para valores positivos de VSP o consumo aumenta de a uma taxa maior quanto maior for o valor médio de VSP. Dessa forma, a equação que mais se adequa a este veículo é a seguinte:

$$\frac{\Delta SOC}{s} = -1.4450 * 10^{-4} * VSP^2 - 7.3008 * 10^{-3} * VSP \quad (4.2.2)$$

Da curva de SOC obteve-se a seguinte simulação da evolução do SOC da bateria ao longo das duas viagens. O resultado está representado na **Figura 4-4**.

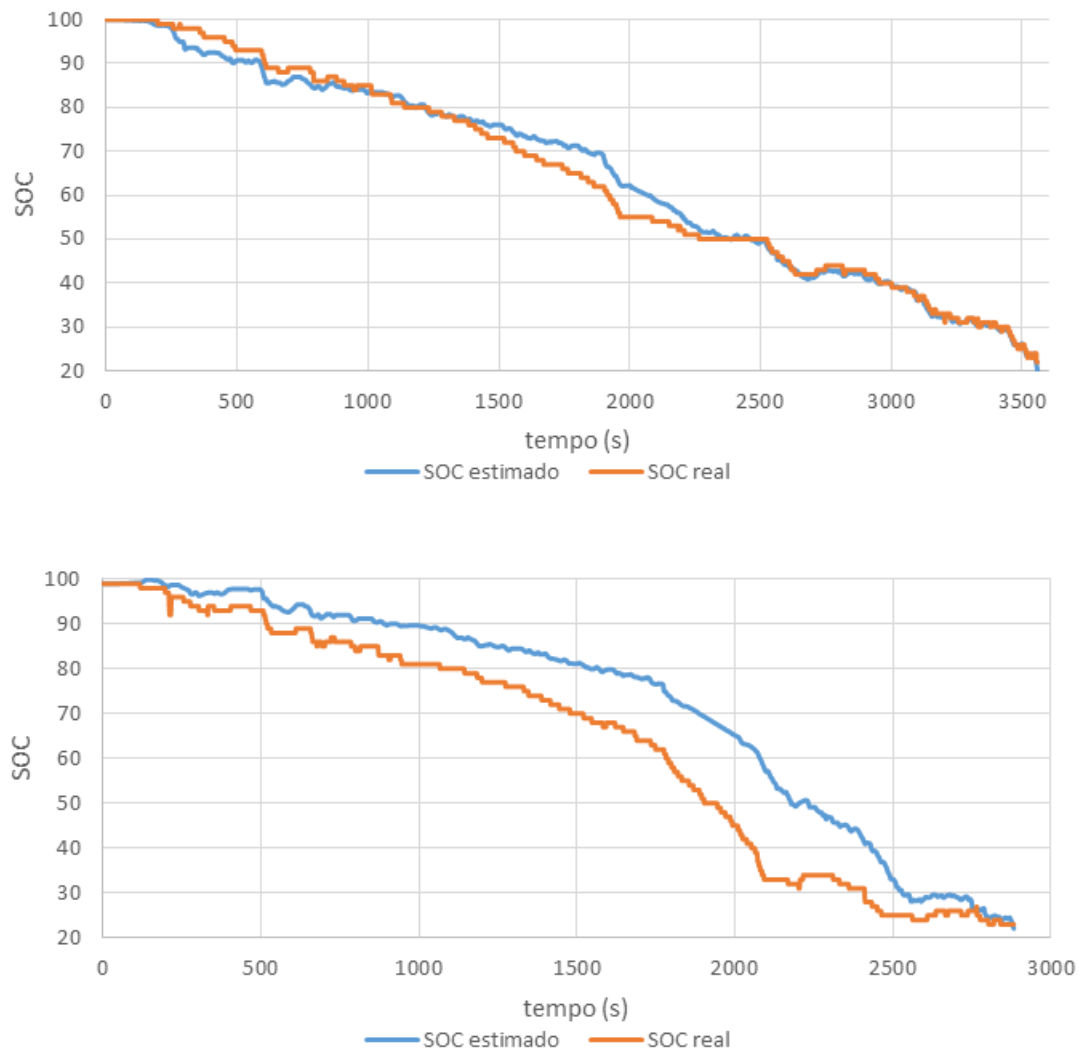


Figura 4-4 – Consumo real vs. Estimado para o veículo A: a) viagem 1 (em cima); b) viagem 2 (em baixo)

Em ambas as estimativas de consumo de bateria obtiveram-se aproximações satisfatórias aos valores reais reportados pelo laboratório portátil (diferença relativa média entre o modelo e o valor real segundo a segundo de 7%), sendo a estimativa do consumo de bateria da primeira viagem com o **veículo A (Figura 4-4 a)** mais próxima da realidade quando comparada com a segunda viagem (**Figura 4-4 b**).

Para a primeira viagem, verifica-se uma diferença reduzida entre os valores medidos e os valores estimados, havendo diferenças relativamente maiores por volta dos 1500 segundos, onde ocorre uma

subestimação do consumo do veículo por parte do modelo aplicado. Essa subestimação está relacionada com a alteração das condições de condução uma vez que por volta desse instante inicia-se o percurso de autoestrada, onde o motor térmico passa a assistir o motor elétrico, tornando o consumo da bateria mais residual. Na segunda viagem o modelo subestima o consumo elétrico numa fase inicial, havendo a reversão dessa tendência por volta dos 2300 segundos.

Veículo B

O mesmo procedimento foi feito para o **veículo B**. Tendo em conta que o veículo B se adequa mais a conduções urbanas e privilegia a maior otimização energética este veículo apresenta uma menor participação do motor térmico durante a fase de depleção de carga. A curva do SOC para o **veículo B** está representada na **Figura 4-5**.

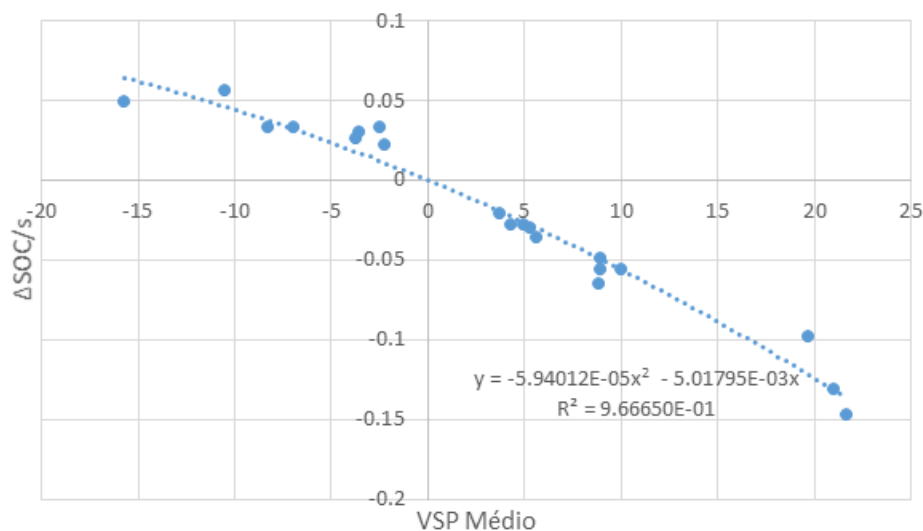


Figura 4-5 - Curva estimativa de consumo de SOC em função de VSP - veículo B

Tal como no caso do **veículo A** o valor do R^2 é superior a 0.95, sendo por isso a curva uma aproximação satisfatória dos valores reais. A equação da curva de consumo de SOC para o **veículo B** é a seguinte:

$$\frac{\Delta SOC}{s} = -5.94012 * 10^{-4} * VSP^2 - 5.01795 * 10^{-3} * VSP \quad (4.2.2)$$

Aplicando a curva de consumo obteve-se a estimativa da evolução do SOC representada na **Figura 4-5**.

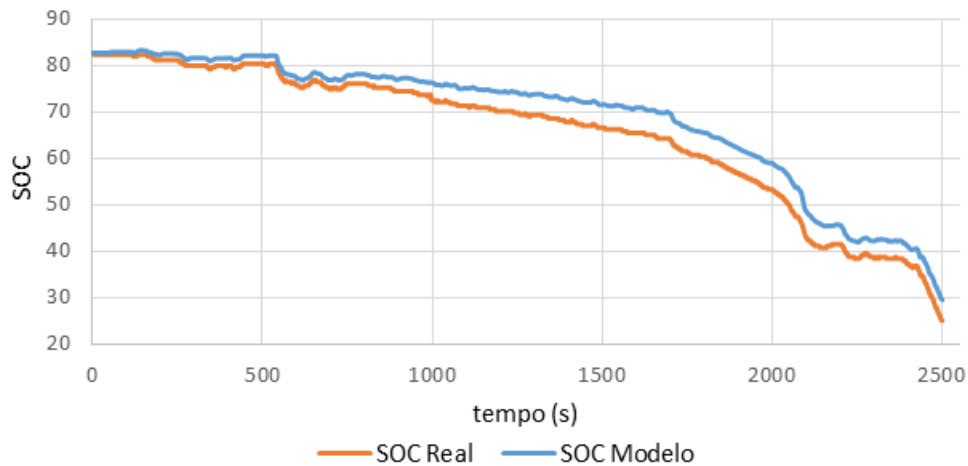
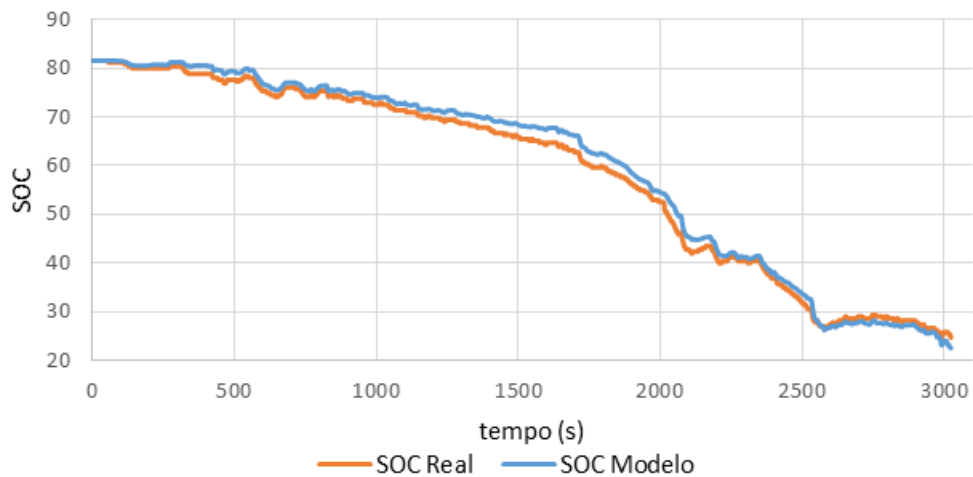


Figura 4-6 - Consumo real vs. Estimado para o veículo B: a) viagem 1 (em cima); b) viagem 2 (em baixo)

A estimativa do consumo da bateria em função das características dinâmicas de ambas as viagens é bastante satisfatória (diferença relativa média entre o modelo e o valor real segundo a segundo de 4%), uma vez que se aproxima bastante dos valores medidos com o laboratório portátil. Uma vez que o veículo possui uma depleção de carga menos dependente do ICE, torna-se mais fácil prever o consumo da bateria pois o funcionamento do veículo assemelha-se bastante a um EV. Pode, no entanto, verificar-se que o modelo é mais preciso para a primeira viagem (**Figura 4-5 a**), havendo uma ligeira sobrestimação do consumo durante a segunda viagem (**Figura 4-5 b**), o que é justificado por uma condução mais agressiva na segunda viagem face à primeira, o que fez a bateria esgotar-se de forma mais rápida.

4.3. Análise por zonas de funcionamento (Depleção de Carga)

Na secção 3.3.3 foi definida uma matriz com o objetivo de obter uma avaliação mais detalhada e focada nos impactes da fase CD, permitindo associar o funcionamento de cada um dos motores no desempenho do automóvel quer ao nível dinâmico, energético e até nas suas emissões. Com a aplicação da matriz descrita em 3.3.3 é possível agrupar cada instante da viagem consoante os motores utilizados na propulsão do veículo, fazendo uma divisão dos instantes em 5 zonas. Para cada instante de cada viagem foi associada uma zona da matriz de funcionamento, o que possibilitou uma análise dos impactes do funcionamento dos dois motores.

Veículo A

O **veículo A**, realizou um total de 1h 47min 29s em CD durante as duas viagens. A distribuição temporal do tempo de ativação do ICE e por zona de funcionamento do **veículo A** encontram-se representadas na **Figura 4-7**.

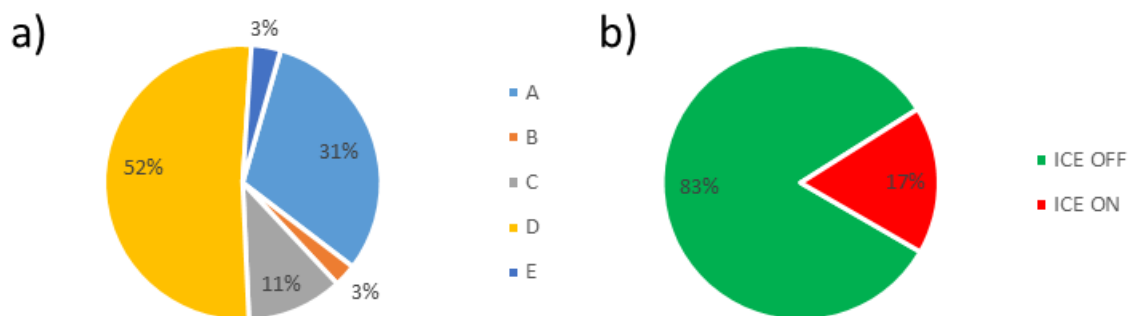


Figura 4-7 - Distribuição temporal: a) Por zonas de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE

Verifica-se, como seria de esperar, que durante a fase de depleção de carga, o veículo usa essencialmente o motor elétrico como fonte de propulsão. Em 83% do tempo, o **veículo A** teve apenas o EM em funcionamento. Nos restantes 17% do tempo, o veículo tem auxílio do motor térmico, sendo que em 11% do tempo funciona apenas com propulsão térmica, como um veículo convencional. No total de ambas as viagens em CD, o motor térmico esteve ativado em 17% do tempo, correspondendo a cerca de 19min.

No total, foram percorridos 78.8 km durante as duas viagens em CD. As distribuições das distâncias por zona de funcionamento encontram-se sintetizadas na **Tabela 4-2** e **Figura 4-8**:

Tabela 4-2 - Distâncias percorridas em cada zona de funcionamento (veículo A)

Zona de funcionamento	A	B	C	D	E
Distância (km)	20.5	3.5	13.9	36.8	4.2

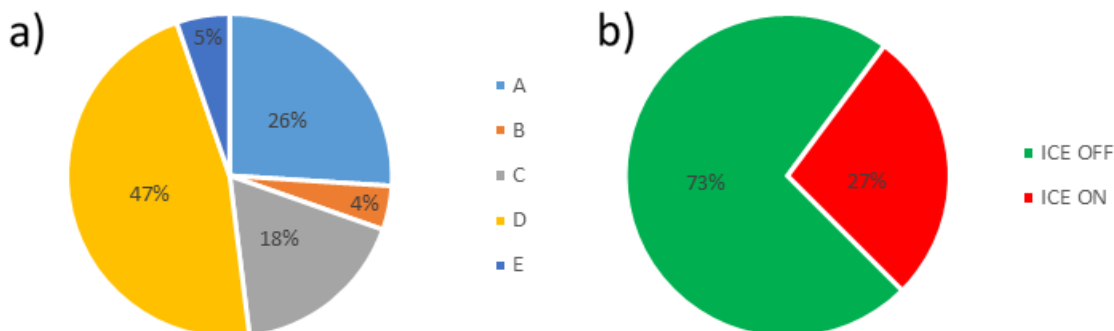


Figura 4-8 - Veículo A - Distâncias percorridas: a) Por zona de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE

Através dos dados da **Tabela 4-2** e **Figura 4-8** pode-se aferir que os quilómetros percorridos em modo 100% elétrico correspondem a 73% da distância total percorrida. Comparando com os dados representados na **Figura 4-7**, verificamos que a proporção da utilização do motor térmico em termos temporais é menor que a da distância percorrida com o ICE ativado. A diferença é justificada pelas velocidades médias mais elevadas atingidas quando o **veículo A** se desloca com o ICE ligado. É possível também denotar que dos 21.5km percorridos com o ICE ativado, 13.9km (65%) foram propulsionados exclusivamente pelo ICE, sem auxílio do EM (zona C). Apenas 4,2 km foram percorridos com os dois motores a gerar potência em simultâneo (zona E). A regeneração correspondeu a 30% da distância percorrida em CD pelo **veículo A**, sendo mais à frente quantificada a estimativa de energia regenerada nas zonas A e B pelo **veículo A**.

A gestão dos motores realizada pela programação do próprio veículo influencia diretamente os valores dinâmicos e de consumo/emissões. Na **Figura 4-9**, encontram-se representados graficamente os valores dinâmicos das viagens do **veículo A**.

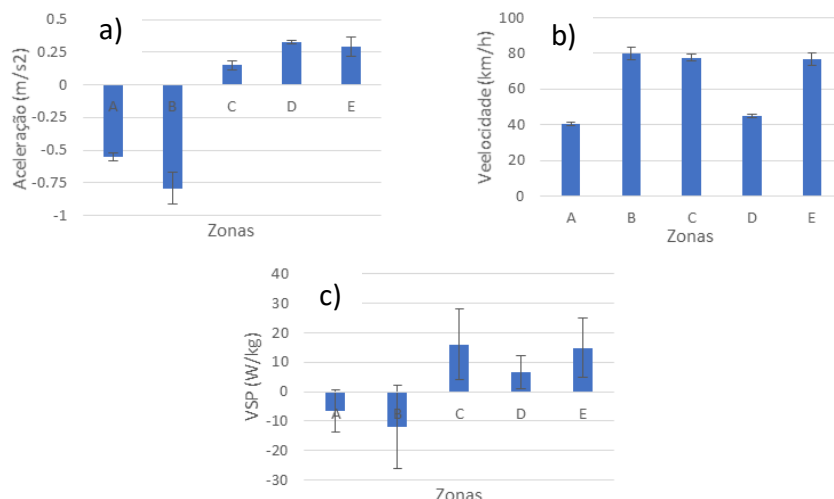


Figura 4-9 - Dados dinâmicos representados por zonas (Veículo A): a) Aceleração; b) Velocidade; c) VSP

Na **Figura 4-9** encontra-se sintetizada a informação sobre os dados dinâmicos das viagens realizadas pelo **veículo A**. É possível verificar que em termos de aceleração o **veículo A** evidenciou maiores valores de aceleração médios (0.33 m/s^2) quando funcionava em modo elétrico (Zona D), o que é justificado pela capacidade de o motor elétrico produzir um binário instantâneo capaz de acelerar o veículo e por a Zona D ser geralmente associada aos arranques do veículo que exigem uma maior aceleração. De notar também que as desacelerações mais acentuadas ocorrem na Zona B (-0.80 m/s^2), onde ambos os motores se encontram em operação devido às maiores velocidades do veículo quando o motor térmico se encontra ativado. As zonas E e C foram as zonas onde a potência consumida foi maior, tendo valores médios de VSP de 16.0 W/kg e 14.9 W/kg respetivamente, o que demonstra que o ICE é utilizado quando a potência requerida é maior.

Os dados relativos ao consumo de gasolina do **veículo A** na fase CD encontram-se demonstrados na **Figura 4-10** e as emissões estão representadas na **Figura 4-11**.

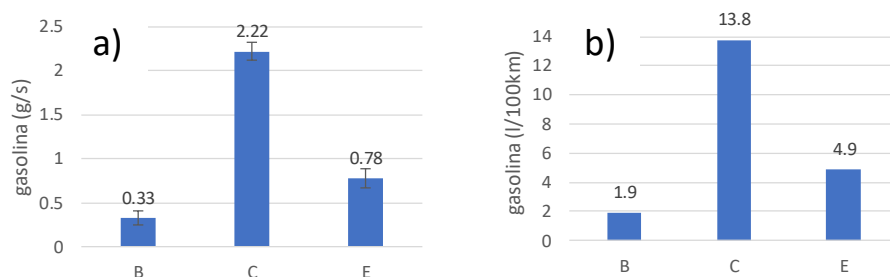


Figura 4-10 – Consumo de gasolina (veículo A): a) consumo médio por segundo; b) consumo total por km

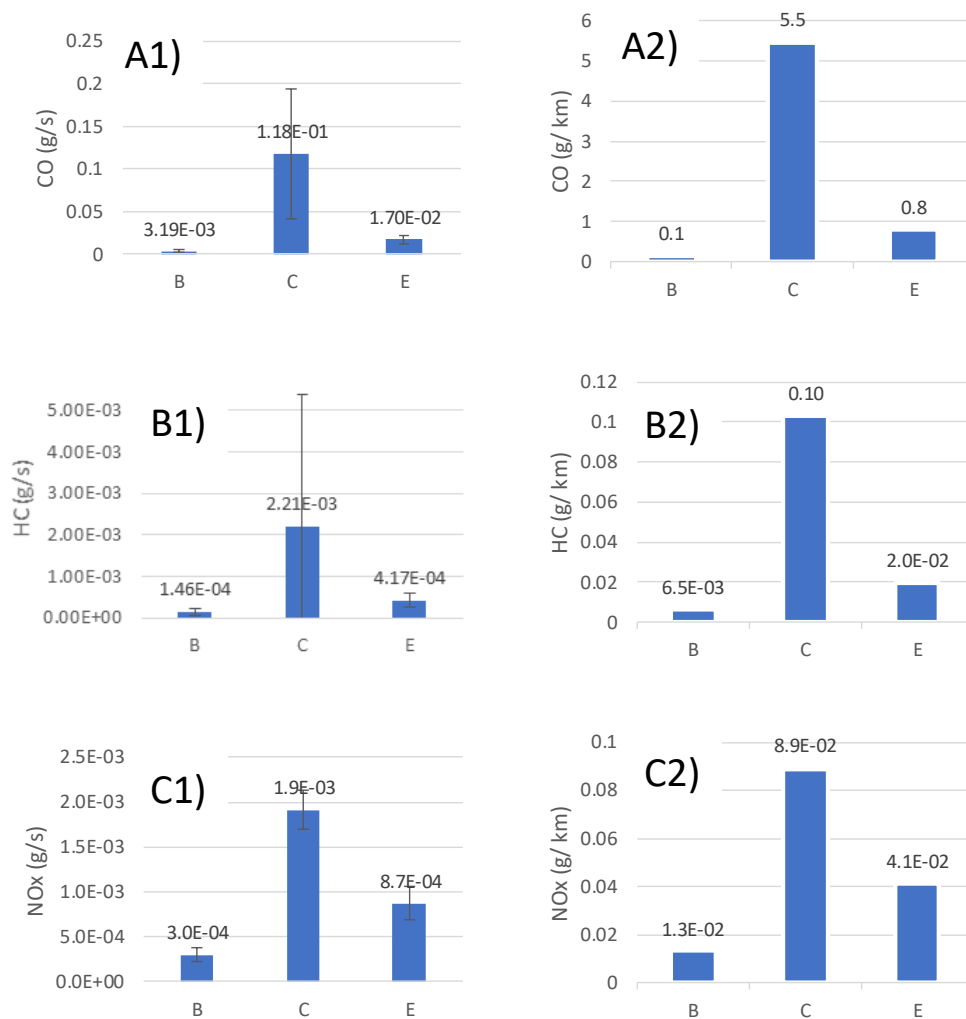


Figura 4-11 - Emissões de poluentes locais (veículo A) (1- emissões médias por segundo; 2- emissões totais por km): A) CO₂; B) CO; C) HC; D) NO_x

Na **Figura 4-11** tem-se em consideração os poluentes monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x) e hidrocarbonetos (HC). A emissão do CO₂ não se encontra representada na **Figura 4-11** uma vez que segue a mesma tendência do consumo de gasolina, representado na **Figura 4-10**. Durante as duas viagens, foram consumidos em média 2.8 l/100km. Considerando apenas o tempo de ativação do ICE, a média foi de 10.1 l/100km, sendo dessa forma ilustrativo o impacto da ativação do ICE no aumento do consumo global de um PHEV. A zona C (motor térmico ativado, motor elétrico desativado) corresponde à zona de maior consumo de gasolina sendo o seu consumo total por km de 13.8 l/100 km, cerca de 180% superior ao consumo na zona E (ambos os motores ativados) e cerca de 7 vezes superior ao consumo na Zona B (regeneração com motor térmico ativado). Quanto às emissões de poluentes, na Zona C foi também claramente a zona de maior impacto nas emissões de CO, HC e NO_x, emitindo valores de 5.5g/km, 0.1g/km, 0.09 g/100km, respetivamente. Em relação ao CO₂, as emissões na zona C são da ordem dos 320 g/km. Na zona E e B as emissões são apenas uma pequena

proporção das emissões da zona C. Em termos globais, durante a CD do **veículo A** as emissões de CO₂, CO, HC e NO_x foram de 64.6 g/km, 1.01g/ km, 1.95x10⁻³ g/km e 1.85x10⁻³ g/km respetivamente.

Em termos globais para ambas as viagens os consumos e emissões são demonstrados na **Figura 4-12**.

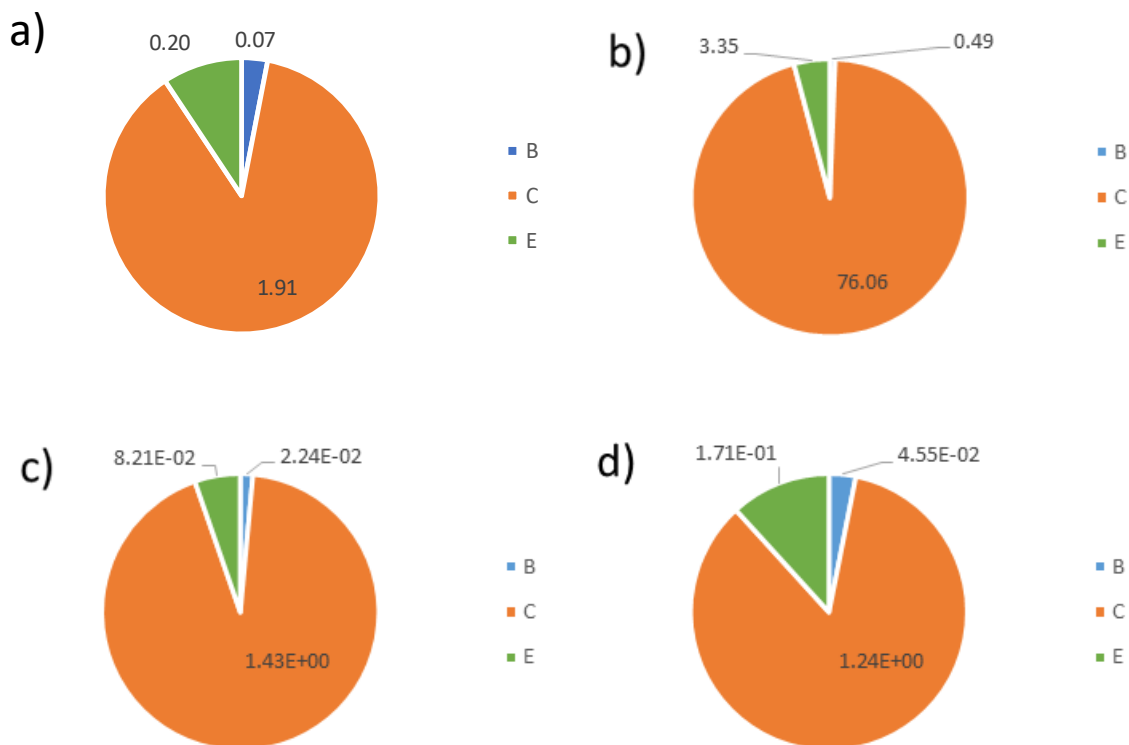


Figura 4-12 – Emissões e consumos globais (veículo A) – a) consumo total de gasolina (l); b) emissões totais de CO (g); c) emissões totais de HC (g); d) emissões totais de NO_x

A **Figura 4-12**, fornece uma representação da proporção do total de emissões e consumo em cada zona de funcionamento. Verifica-se que a zona C é claramente a zona com mais impactes no ponto de vista das emissões e consumos. No total, foram emitidos 79.90g, 1.54g e 1.45g de CO, HC e NO_x respetivamente, durante os 78.8 km percorridos pelo **veículo A**. A zona C é responsável pela emissão de 95%, 93% e 85% do CO, HC e NO_x respetivamente. A zona E é a segunda com maior impacte nas emissões de poluentes, mas ainda assim as suas emissões não passam de uma pequena porção das emissões globais. Apenas no caso das emissões de NO_x a zona E é responsável por mais de um décimo das emissões globais (12%), sendo a sua contribuição bem mais reduzida nas emissões de CO e HC (4% e 5%, respetivamente). A zona B tem um impacte bastante reduzido nas emissões globais, sendo responsável por menos de 3% das emissões de NO_x e de 1% de CO e HC. Em relação ao consumo, a zona C é também a zona largamente dominante, responsável por 1.91l de gasolina. Na zona E foram consumidos 0.20 l de gasolina e na zona B 0.07 l de gasolina.

Pode concluir-se que o **veículo A** está programado para ter uma condução mais desportiva na Zona C, sendo o motor elétrico desativado quando as cargas são mais elevadas, o que se reflete num maior consumo de gasolina e emissões. Se observarmos a **Figura 4-9** é demonstrado que as velocidades e

potências mais altas são atingidas nas zonas onde existe auxílio do motor térmico. Do ponto de vista da maior eficiência energética, uma condução mais moderada, sem grandes requisitos de aceleração e velocidade, permite um consumo energético mais reduzido e um melhor aproveitamento das características elétricas do **veículo A**.

O **veículo A** apresentou um consumo em CS de 7.3 l/100km de acordo com os dados recolhidos. Utilizando o **veículo A** em CD, o que implica um carregamento da bateria frequente e uma distância percorrida diária não superior a 39km (**Tabela 3-2**) é possível obter poupanças consideráveis em combustível. Nas duas viagens realizadas obteve-se um consumo de gasolina médio de 2.8 l/100km, 4.5 l/100km a menos quando comparado com o veículo convencional semelhante, correspondendo a uma poupança de 3.5 l no total dos 78 km percorridos. Ao preço atual da gasolina em Portugal à data consultada (1.598 €/l gasolina 95 simples[44]), obteve-se uma poupança de 5.59€ em combustível para os 78.8km percorridos pelo **veículo A** em CD, cerca de 0.07€/km.

Veículo B

O **veículo B** realizou um total de 1h 51min 40 s de testes. A distribuição temporal por zonas de funcionamento e a percentagem de utilização do ICE são demonstradas na **Figura 4-13**.

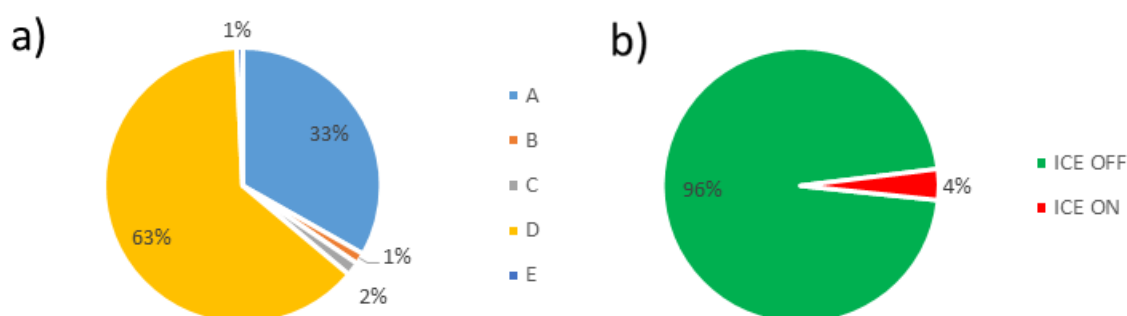


Figura 4-13 – Veículo B - Distribuição temporal: a) Por zonas de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE

Como se pode verificar, o veículo B funciona predominantemente como EV. Apenas em 4% do tempo, 3min 42s no total do tempo de viagem em CD, foi feita com propulsão térmica. Desse tempo, 1min 22s foi realizado meramente com propulsão térmica (zona C) e 44s com ambos os motores. O restante tempo de funcionamento do ICE foi realizado em regeneração. No total, 34% do tempo foi realizado em regeneração e 66% em aceleração.

O **veículo B** realizou um total de 87.5km em CD. Na **Tabela 4-3** e **Figura 4-12** são apresentadas as distâncias percorridas em cada zona de funcionamento, bem como a sua proporção no total das viagens.

Tabela 4-3 - Distâncias percorridas em cada zona de funcionamento (veículo B)

Zona de funcionamento	A	B	C	D	E
Distância (km)	26.1	1.4	1.7	57.6	0.77

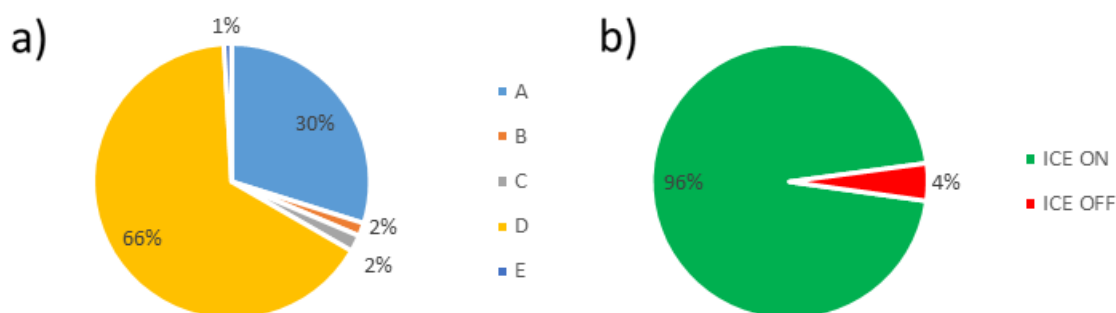


Figura 4-14 – Veículo B - Distâncias percorridas: a) Por zona de funcionamento; b) Por funcionamento do ICE

Contrariamente ao verificado no **veículo A**, a **Tabela 4-3** e a **Figura 4-8** demonstram que as distribuição das distâncias percorridas em cada uma das zonas de funcionamento no **veículo B** são muito semelhantes à sua distribuição temporal. A fração da distância percorrida com auxílio do motor térmico é equivalente à fração do seu tempo de ativação (4%), correspondendo a pouco mais de 3.8km. Sendo o **veículo B** desenhado para uma condução mais económica a menor utilização do ICE é compreensível.

De seguida, na **Figura 4-15** encontram-se representadas as características dinâmicas das viagens do **veículo B**.

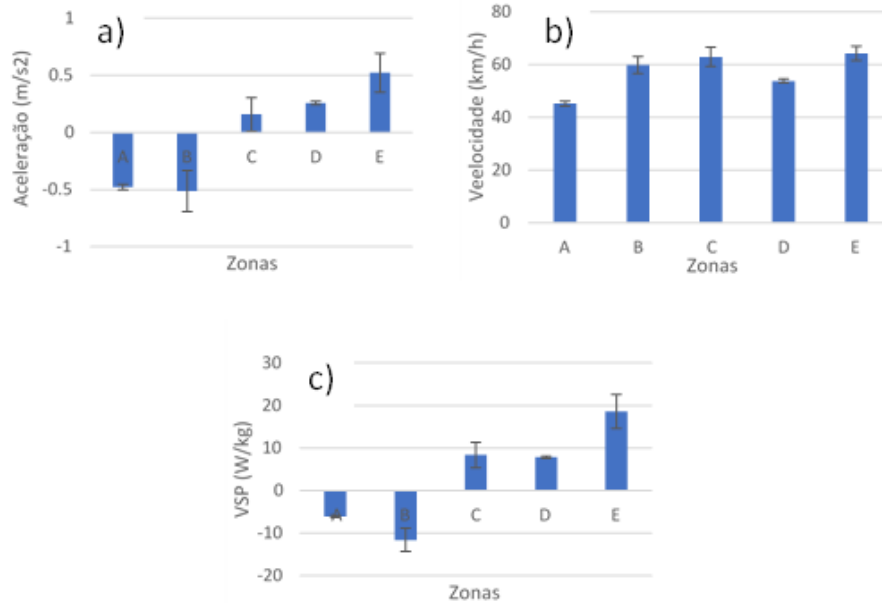


Figura 4-15 - Dados dinâmicos representados por zonas (Veículo B): a) Aceleração; b) Velocidade; c) VSP

Pode observar-se na **Figura 4-15** que o ICE é utilizado em instantes com potências bastante acima da média. No entanto, ao contrário do que foi observado no **veículo A**, os instantes de maior potência e aceleração são aqueles onde ambos os motores participam na propulsão do carro (Zona E) (VSP = 18.6 W/kg e Aceleração = 0.52 m/s²). A velocidade também foi maior quando o ICE esteve ativado (zona B = 50 km/h; zona C = 63 km/h; zona E = 64 km/h). O motor térmico entra em funcionamento nas potências mais elevadas, sendo por isso utilizado com o intuito de preservar a carga da bateria pelo maior período de tempo possível. Outro dado importante a ter em conta é o reduzido tempo de ativação do ICE, que leva a uma amostra mais reduzida de pontos das zonas B, C e E e que resulta num maior intervalo de confiança nas médias calculadas. Outra diferença do **veículo B** face ao **veículo A** é que a potência alcançada através do funcionamento exclusivo do motor térmico (zona C) é menos de metade da potência média alcançada quando ambos os motores se encontram em funcionamento (zona E), sendo a causa provável dessa diferença a baixa potência do motor térmico que lhe impossibilitam providenciar acelerações muito elevadas.

Quanto ao consumo de gasolina e respetivas emissões, dados obtidos encontram-se na **Figura 4-16** e **Figura 4-17**.

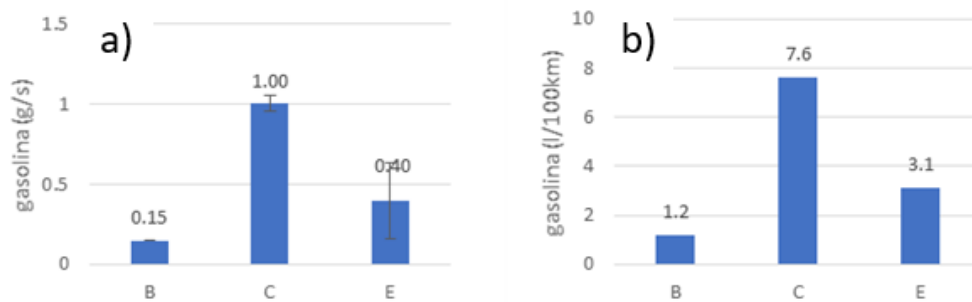


Figura 4-16 - Consumo de gasolina (veículo B)

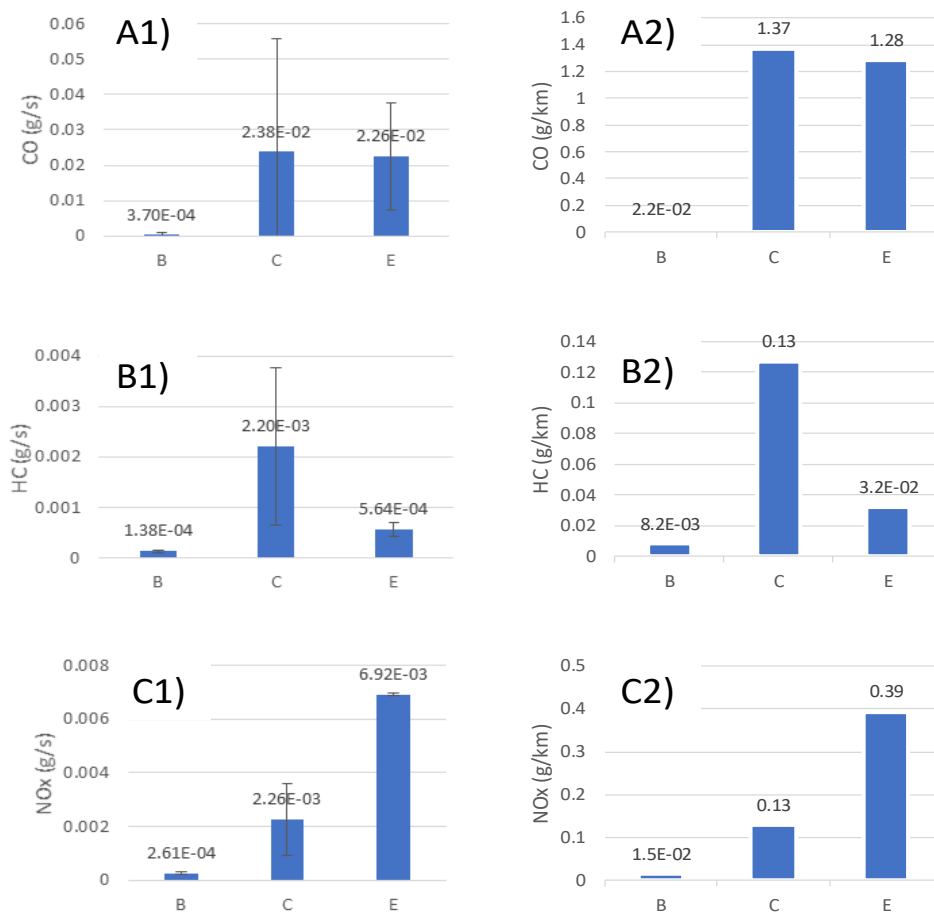


Figura 4-17 - Emissões de poluentes locais (veículo B) (1- emissões médias por segundo; 2- emissões totais por km percorrido): A) CO₂; B) CO; C) HC; D) NO_x

A **Figura 4-16** demonstra que o consumo de gasolina por unidade de distância percorrida na zona C é ligeiramente maior que dobro do valor da zona E. Durante as duas viagens do **veículo B** a média de consumo foi de apenas 0.2 L/100km. Para os instantes onde o ICE estava ativado, a média de consumo estabeleceu-se nos 4.4 L/100km. No entanto, a zona C é responsável por 7.6 L/100km, um valor 242% maior que a zona E e 642% maior que a Zona B, sendo dessa forma a zona com maior impacte nos consumos globais em CD. Em termos de emissões de CO₂ as proporções são semelhantes às da gasolina, sendo as emissões da zona C 181 g/100km, na zona E 70 g/km e na zona B 28 g/100km. Relativamente aos restantes poluentes, encontram-se as informações na **Figura 4-17**. O CO apresenta valores emitidos semelhantes na Zona C e E (1.37 g/km e 1.28 g/km respetivamente) e valores muito reduzidos na zona B (praticamente 0 g/km). Os HC têm por sua vez uma distribuição por zonas semelhante ao consumo de gasolina, sendo que as suas emissões por cada 100km são consideravelmente superiores na zona C (0.13 g/km) quando comparados com a Zona E e B, sendo ainda assim ligeiramente superiores na zona E (praticamente 0 g/km). Quanto aos NO_x, as emissões são bastante superiores na zona E (0.39 g/km) quando comparados com a zona C (0.13 g/km) e a zona B (praticamente 0 g/km). Verifica-se que os poluentes locais emitidos apresentam alguma independência do consumo de gasolina (à exceção do CO₂).

Os consumos e emissões globais do **veículo B** encontram-se representados na **Figura 4-18**.

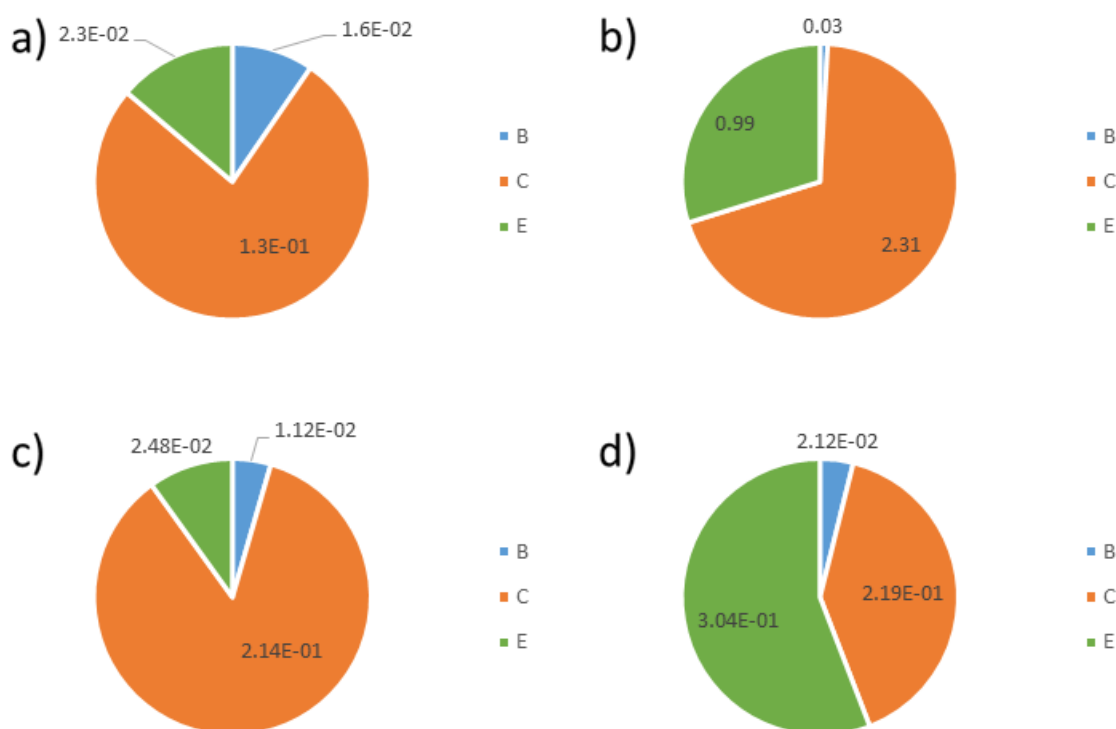


Figura 4-18 – Emissões e consumos globais (veículo A) – a) consumo total de gasolina (l); b) emissões totais de CO (g); c) emissões totais de HC (g); d) emissões totais de NO_x

Na análise da **Figura 4-18** deve ter-se em consideração a distância percorrida em cada zona de funcionamento (**Tabela 4-3**). Pode verificar-se que a zona C é a zona com maior quantidade de gasolina consumida (0.13l), CO (2.31 g) e HC (0.214 g) emitidos. No entanto, as emissões globais de NO_x ocorrem maioritariamente na zona E, apesar da distância percorrida pelo **veículo B** ser menor na Zona E quando comparado com as restantes zonas. Quer as emissões de poluentes locais, quer o consumo de gasolina é mais reduzido no **veículo B** em comparação com **veículo A**, devido ao menor tempo de ativação do seu ICE.

Pode concluir-se que a fase de depleção de carga do **veículo B** apresenta uma menor dependência de combustível quando comparado com o **veículo A**. Os dados sugerem que a zona E (ICE e EM ativados) corresponde à zona de maior potência, alcançando o **veículo B** valores de VSP mais elevados. Sendo o **veículo B** otimizado para uma condução mais económica, o tempo de ativação do ICE é bastante reduzido, funcionando como EV durante a grande maioria do tempo da CD. Os poucos instantes onde ocorreu a ativação do ICE os consumos de gasolina foram baixos, o que permitiu um reduzido valor de 0.2L/100km durante a fase CD.

Para uma quilometragem diária na ordem dos 40km e com um ciclo de condução semelhante ao apresentado neste trabalho é possível obter uma poupança considerável no que toca ao consumo. Considerando o consumo em CS do **veículo B** (4.3 l/100km) e considerando o consumo em CD de 0.2 l/100km, o carregamento constante permite uma poupança de 4.2 l/100km. Para as viagens realizadas, no total dos 87.5 km percorridos em CD o consumo foi 3.6 l menor do que seria numa viagem da mesma distância em média em CS, o que permite uma poupança de 5.80€, cerca de 0.07€/km.

4.4. Análise por modo VSP

Com a aplicação da metodologia explicada em 3.2 foi possível atribuir um modo VSP a cada instante da viagem e conseqüentemente avaliar os impactos de cada um dos 14 modos. A análise a ambos os veículos foi feita dividindo os períodos de depleção e de sustentação de carga dos mesmos.

Veículo A

Durante as duas viagens, o **veículo A** realizou 107 minutos em CD e 126 minutos em CS. O tempo em cada modo VSP para ambas as fases encontra-se representado na **Figura 4-19**.

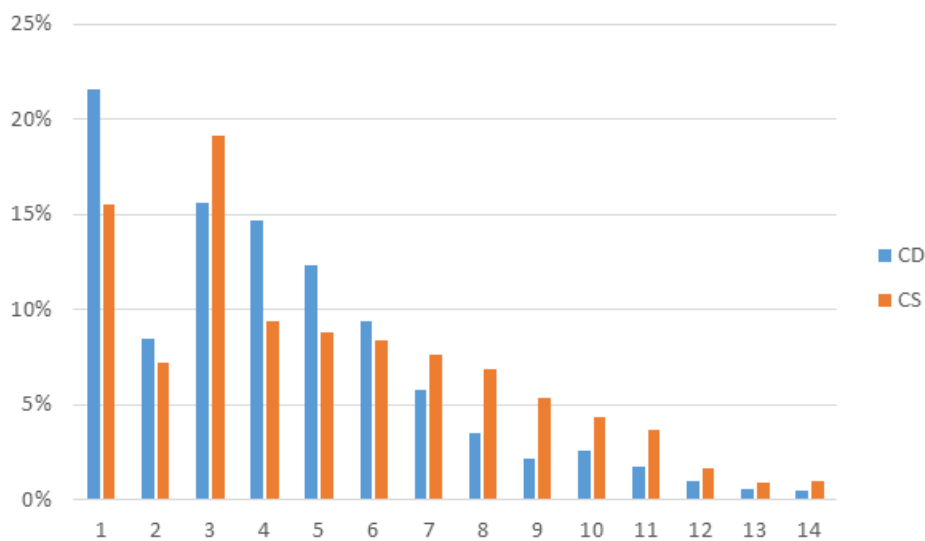


Figura 4-19 - Distribuição temporal por modo VSP em CD e CS (veículo A)

Na **Figura 4-19** é possível verificar uma maior predominância dos modos de VSP mais baixos para a fase CD do **veículo A**. As principais diferenças detetadas são a maior predominância dos modos mais elevados na fase CS, nomeadamente a partir do modo 7, e os modos 1 e 2, correspondentes às regiões de regeneração.

A aceleração e velocidade médias em cada modo VSP encontram-se representadas na **Figura 4-20** e **Figura 4-21**.

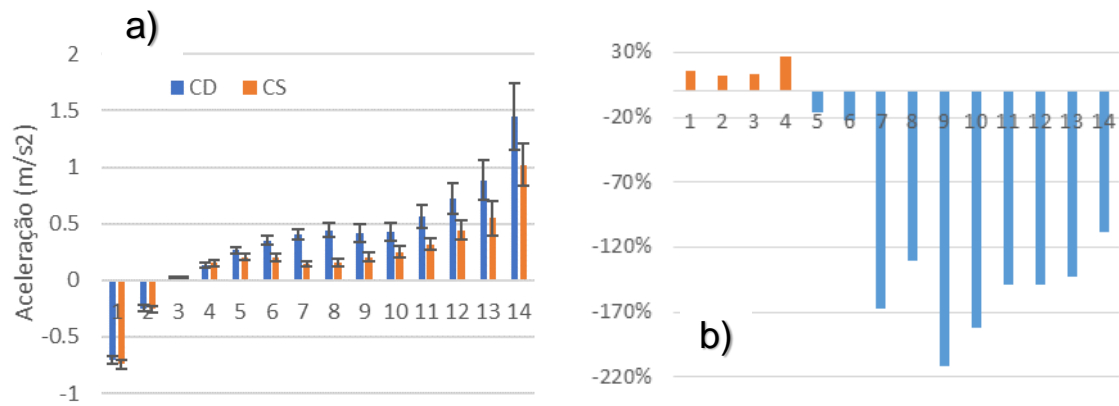


Figura 4-20 – Veículo A: a) Aceleração (m/s²) ; b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)

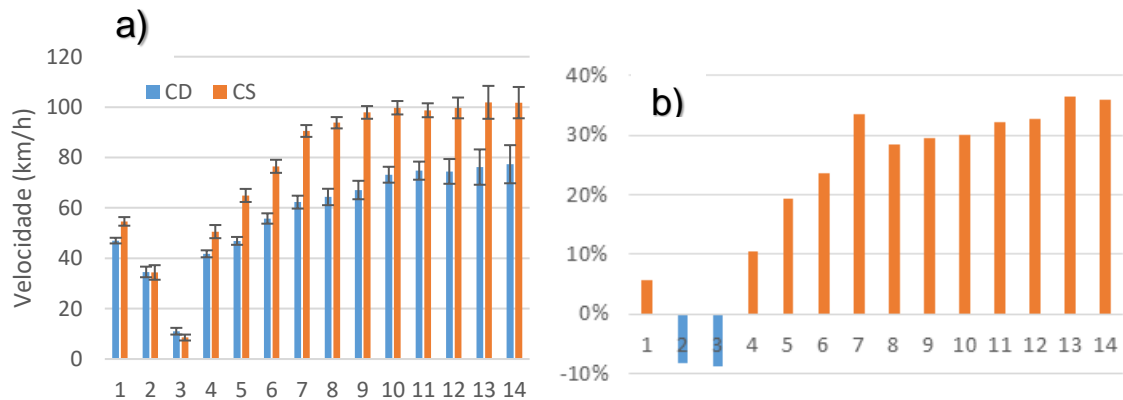


Figura 4-21 – Veículo A: a) Velocidade (km/h) ; b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)

Como se pode verificar na **Figura 4-20** e na **Figura 4-21**, a aceleração e velocidade têm valores médios semelhantes para os modos mais baixos de VSP em CD e CS. No entanto, a partir do modo 6, essas diferenças intensificam-se, sendo a aceleração consideravelmente mais alta nos modos mais altos de VSP em CD, contrariamente à velocidade que é mais baixa em CD para os modos VSP mais altos. A aceleração mais alta é justificada pela maior participação do motor elétrico em CD. Em CS, acontece o contrário, a velocidade é maior nos modos mais altos de VSP em CS, o que pode ser justificado pela maior potência do motor térmico e pelo facto de em CD a economia da bateria inibir uma condução a maior velocidade.

Para o consumo de gasolina em l/100km a informação encontra-se sintetizada na **Figura 4-22**.

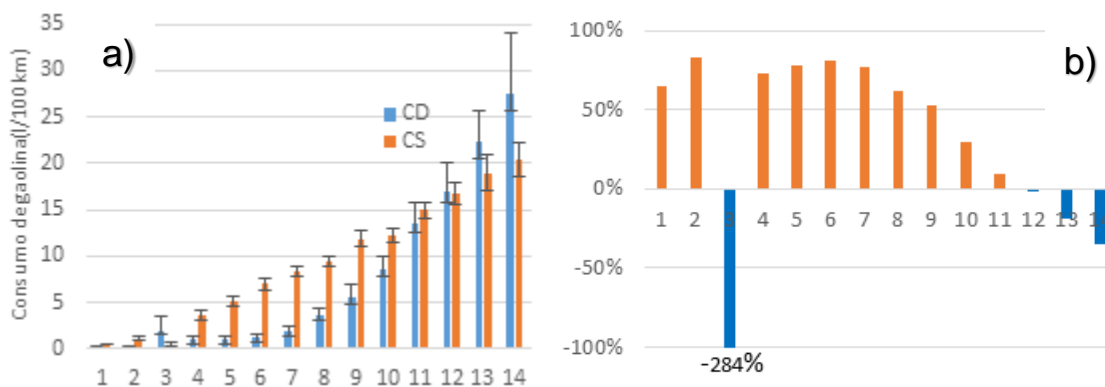


Figura 4-22 – Veículo A: a) Consumo de gasolina (l/100km); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)

Em termos de consumo de gasolina por unidade de distância percorrida, a **Figura 4-22** sugere que o **veículo A** possui um consumo de combustível mais alto em grande parte do espectro de VSP durante a fase CS. No entanto, nos modos de maior potência (12, 13 e 14) o consumo de combustível é maior em CD. Para o modo 3 o consumo de combustível é bastante superior em termos relativos uma vez que está associado à fase inicial onde o motor se liga mais vezes. Em termos médios, o consumo de gasolina em CD foi de 2.8l/100km e em CS foi de 7.2l/100km.

Em termos de utilização do ICE em CD e CS a informação encontra-se na **Figura 4-23**.

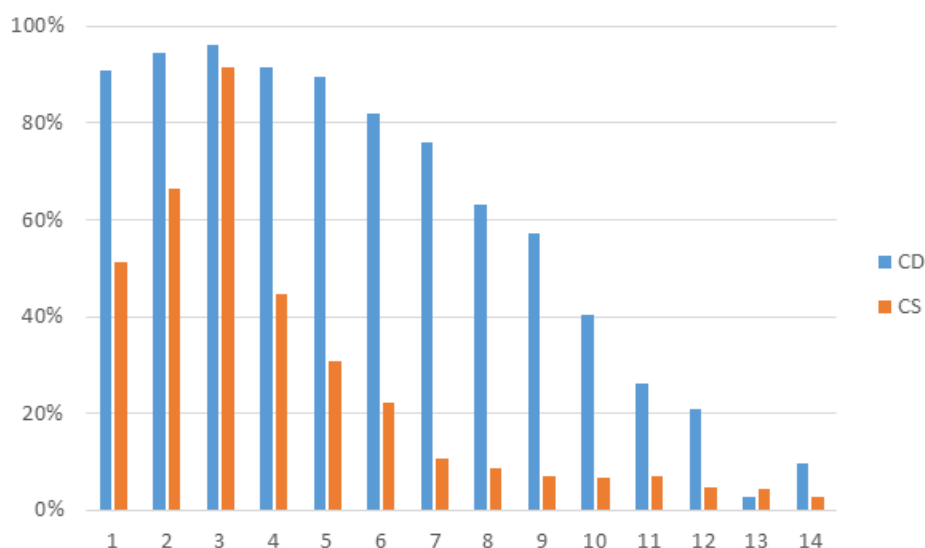


Figura 4-23 – Percentagem de tempo com ICE desativado (veículo A)

A **Figura 4-23** demonstra a larga diferença entre o tempo de desativação do ICE em CD face a CS. Em CD, o **veículo A** opera sem utilizar o ICE na durante a grande maioria do tempo (85%). Nos modos VSP mais baixos o motor térmico encontra-se desligado durante mais de 85% do tempo (até ao modo 5 inclusive). A partir dos modos mais altos, com o aumento da demanda de potência, o motor térmico passa a ser mais vezes ativado como forma de preservação da bateria, sendo que no modo de VSP

13, o motor térmico opera durante 97% do tempo. No modo 14 parece haver uma inversão desta tendência, havendo dessa forma uma ativação do motor térmico durante 90% do tempo, diminuindo dessa forma 7% face ao modo anterior, no entanto, os dados recolhidos nesse modo em CD foram reduzidos o que diminui a confiança dos resultados. Quanto à fase CS, o motor térmico encontra-se desativado em 41% do tempo, demonstrando a maior participação do mesmo quando comparado com a fase CD. Ainda assim, no modo 3 o motor esteve desativado em 92% do tempo, o que em parte é justificado pelo facto de neste modo serem considerados os instantes onde o VSP é nulo e o veículo se encontra parado com ambos os motores desativados. No entanto, a partir do modo 4 a tendência de utilização do ICE demonstra que o motor esteve ativo cada vez mais tempo, consoante a potência demandada.

Em termos globais, o consumo instantâneo de energia em kW em CD está representado na **Figura 4-24**.

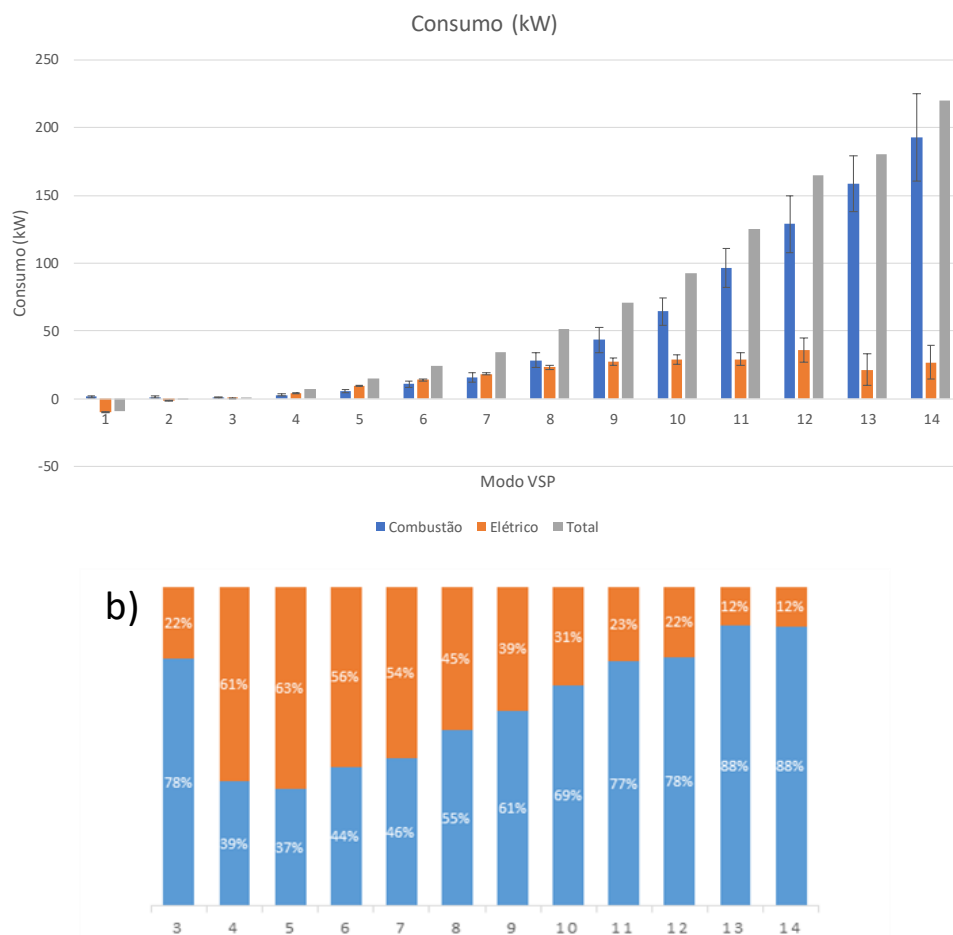


Figura 4-24 – Consumo global do veículo A em CD: a) consumo por motor (MJ/s); b) fração do consumo total de energia consumida por motor (em baixo)

Um ICE a gasolina tem um rendimento na ordem dos 30% [45] e um EM na ordem dos 80-90% [46], sendo por isso, para condições dinâmicas iguais, necessária uma maior quantidade de energia sob forma de combustível num ICEV do que a energia necessária sob forma de eletricidade requerida por

um EV. No caso do PHEV, será de esperar que os consumos totais energéticos sejam por essa razão menores durante a fase CD, do ponto de vista global, como resultado da maior eficiência energética desse modo de operação. No global da fase CD, 35% da energia consumida foi gerada pelo EM. Como se pode observar na **Figura 4-24**, o motor térmico tem maior participação no consumo energético total do **veículo A** nos modos mais altos de VSP (a partir do modo 8), sendo tanto maior quanto maior a potência requerida pelo veículo. Para os modos 4 a 7 existe uma maior participação do EM no consumo global de energia do veículo, o que é justificado pela menor utilização do ICE (**Figura 4-23**). Os modos 1 e 2, correspondentes à regeneração do EM, permitiram durante a primeira viagem uma recuperação total estimada de 2434 kWh (37% da capacidade utilizável da bateria, 32% da capacidade total) e de 1800 kWh (28% da capacidade utilizável da bateria, 23% da capacidade total da bateria).

Uma estimativa qualitativa do rendimento dos motores do **veículo A** em CD em função do modo VSP encontra-se representado na **Figura 4-25**. O rendimento foi calculado através da seguinte equação:

$$\eta_{propulsão} = \frac{P_{motor\ elétrico} + P_{motor\ térmico}}{VSP * peso_{veículo}} \quad (4.4.1)$$

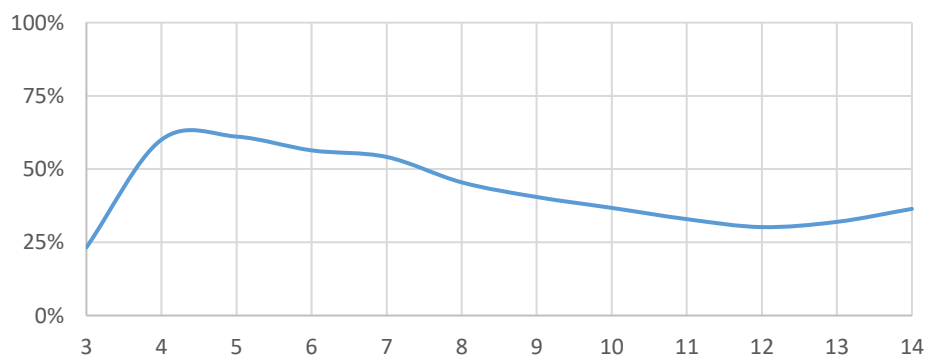


Figura 4-25 – Rendimento dos motores (EM + ICE) por modo VSP em CD

Sendo $P_{motor\ elétrico}$ a potência média por modo VSP do EM em W, $P_{motor\ térmico}$ a potência média por modo VSP do ICE em W, VSP o valor de VSP médio por modo VSP em W/kg e o peso do veículo em unidades de kg. De notar que o cálculo do rendimento é meramente estimativo, havendo uma incerteza considerável associada devido a possíveis erros de medição instantâneos e ao facto da medição do consumo elétrico ser feito indiretamente o que leva a um afastamento inevitável dos valores reais. Ainda assim, é possível desta forma verificar de forma aproximada os modos de VSP onde o rendimento é maior ou menor e de que forma o valor instantâneo de potência requerida influencia o desempenho energético do veículo.

Como se pode observar com a **Figura 4-25** a evolução do rendimento do conjunto de motores do **veículo A** tem uma tendência semelhante à representação gráfica da desativação do ICE (**Figura 4-23**) o que demonstra que a eficiência de um PHEV é tanto maior quanto menor for a ativação do ICE. A eficiência máxima ocorre entre os modos 4 e 5, onde o **veículo A** opera como EV durante mais

de 90% do tempo. No entanto, no modo 3 existe um rendimento baixo, uma vez que é durante este modo de VSP que ocorrem os momentos de paragem do veículo. Nos instantes onde o veículo se encontra parado, ambos os motores se encontram desativados, o que leva a uma grande percentagem de tempo de desativação do ICE. No entanto, quando comparada a proporção da utilização do ICE com a utilização do EM no modo VSP 3 é possível notar que a componente térmica é ainda assim maior quando comparada com a componente elétrica (**Figura 4-24 b**) o que leva a uma menor eficiência neste modo VSP.

Em termos de emissões por modo VSP, a informação encontra-se sintetizada na **Tabela 4-4**

As emissões de CO são mais reduzidas nos modos de VSP mais baixos para a fase CD em relação à fase CS, invertendo-se essa tendência nos modos mais elevados. Em relação aos HC, é possível verificar o contrário do observado para o CO, uma vez que durante a fase CD existem emissões mais altas comparativamente à fase CS nos modos mais baixos de VSP, sendo que quanto mais alto o modo menor a diferença entre as emissões, ocorrendo até emissões mais altas de HC no modo 14 de VSP em CS. Os NO_x são também emitidos em maior quantidade nos modos mais altos de VSP em CD, sendo que para os modos mais baixos as emissões são maiores em CS. As emissões de CO, HC e NO_x dependem da temperatura do ICE para além do consumo instantâneo de gasolina. A diferença proporcional entre as emissões destes poluentes em CD comparativamente às suas emissões em CS é menor que a diferença entre o combustível consumido e o CO₂ emitido pelo facto do ICE estar mais tempo desativado e dessa forma com uma temperatura menor, levando a arranques a frio que provocam picos instantâneos de emissão destes poluentes, bastante superiores aos valores emitidos no normal funcionamento do ICE [47]. Os picos de emissão durante os arranques a frio levaram ao aumento dos intervalos de confiança nas emissões em CD, sendo mais visíveis nos modos VSP onde os valores emitidos foram mais elevados. Os picos de emissão durante os arranques a frio levaram ao aumento dos intervalos de confiança nas emissões de CO, HC e NO_x em CD, sendo mais visíveis nos modos VSP onde os valores emitidos foram mais elevados.

Tabela 4-4 - Emissões locais por modo VSP (Veículo A)

	CO ₂				CO				HC				NO _x			
	CD		CS		CD		CS		CD		CS		CD		CS	
	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf
1	0.1	0.0	0.2	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.3E-05	9.1E-06	3.1E-06	9.6E-07	2.7E-05	9.5E-06	3.1E-05	1.6E-05
2	0.1	0.0	0.3	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	7.2E-06	7.9E-06	4.0E-06	1.8E-06	1.8E-05	9.7E-06	3.0E-05	1.7E-05
3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.1E-03	2.0E-03	7.9E-07	3.6E-07	1.4E-05	6.5E-06	6.8E-06	3.7E-06
4	0.2	0.1	1.1	0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	5.5E-05	2.2E-05	1.2E-05	2.7E-06	3.9E-05	1.3E-05	8.4E-05	2.0E-05
5	0.4	0.1	2.0	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	6.0E-05	2.4E-05	2.1E-05	3.9E-06	8.1E-05	2.4E-05	1.7E-04	4.8E-05
6	0.7	0.1	3.2	0.2	0.00	0.00	0.01	0.00	5.1E-05	2.2E-05	2.4E-05	4.7E-06	1.8E-04	4.1E-05	3.0E-04	6.4E-05
7	1.1	0.2	4.6	0.2	0.00	0.00	0.02	0.03	7.7E-05	4.1E-05	4.5E-05	8.3E-06	2.5E-04	5.6E-05	5.7E-04	1.4E-04
8	1.9	0.4	5.7	0.2	0.01	0.00	0.01	0.00	1.6E-04	9.9E-05	6.6E-05	1.0E-05	4.8E-04	1.1E-04	6.5E-04	1.5E-04
9	2.9	0.7	7.1	0.3	0.01	0.00	0.03	0.03	1.2E-04	1.6E-04	8.7E-05	1.4E-05	8.7E-04	3.1E-04	8.3E-04	1.7E-04
10	4.3	0.6	7.8	0.3	0.02	0.00	0.01	0.00	8.9E-04	4.3E-04	9.8E-05	1.7E-05	2.2E-03	7.6E-04	8.5E-04	1.5E-04
11	6.4	1.0	9.4	0.4	0.09	0.12	0.03	0.01	2.5E-04	2.1E-04	9.1E-05	1.9E-05	1.7E-03	3.5E-04	1.6E-03	3.9E-04
12	8.6	1.4	10.7	0.6	0.08	0.05	0.06	0.02	1.5E-04	1.4E-04	9.8E-05	2.7E-05	1.9E-03	3.8E-04	1.4E-03	4.2E-04
13	10.2	1.4	12.0	0.8	0.36	0.57	0.08	0.03	1.5E-04	1.5E-04	1.2E-04	4.7E-05	2.1E-03	4.0E-04	1.8E-03	8.1E-04
14	11.3	2.4	12.6	1.0	1.18	1.34	0.15	0.07	5.4E-05	7.3E-05	1.8E-04	4.1E-05	2.7E-03	1.0E-03	1.3E-03	4.5E-04

Veículo B

O **veículo B** realizou 112 min em CD e 98 min em CS. A distribuição temporal por cada modo VSP é demonstrada na **Figura 4-26**.

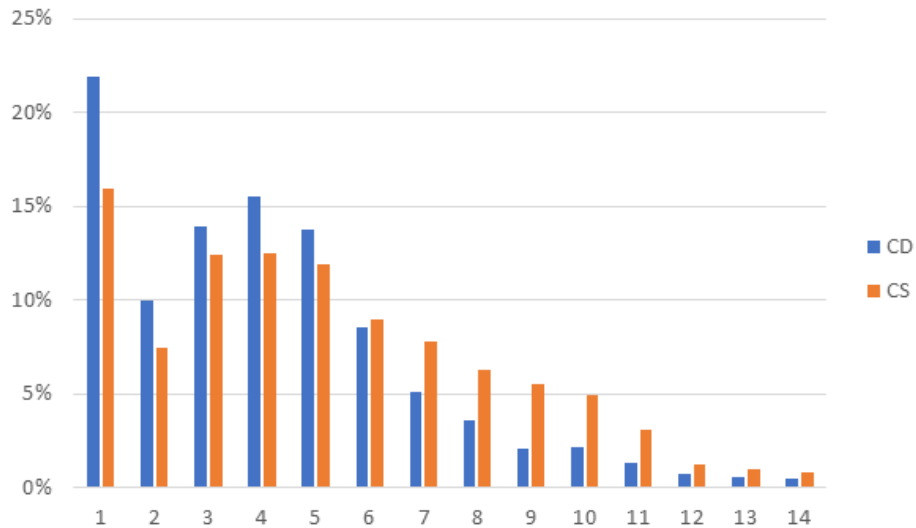


Figura 4-26 - Distribuição temporal por modo VSP em CD e CS (veículo B)

À semelhança do verificado no **veículo A** (**Figura 4-19**), a **Figura 4-26** demonstra que houve uma maior predominância do tempo de viagem realizado pelo **veículo B** em modos mais baixos de VSP em CD face a CS. Desde o modo 1 até ao modo 5 existe uma vantagem de proporção de tempo do veículo em CD face a CS. No entanto, a partir do modo VSP 6, ocorre uma inversão, e a distribuição temporal para instantes onde a potência é maior em CS quando comparada com CD. Tal como no **veículo A**, isto verifica-se provavelmente por haver uma maior preocupação do condutor numa condução que preserve pelo maior tempo possível o estado de carga da bateria, mas também pelos mecanismos de regeneração e poupança de energia do próprio veículo.

A aceleração e velocidade por modo VSP encontram-se demonstradas na **Figura 4-27**.

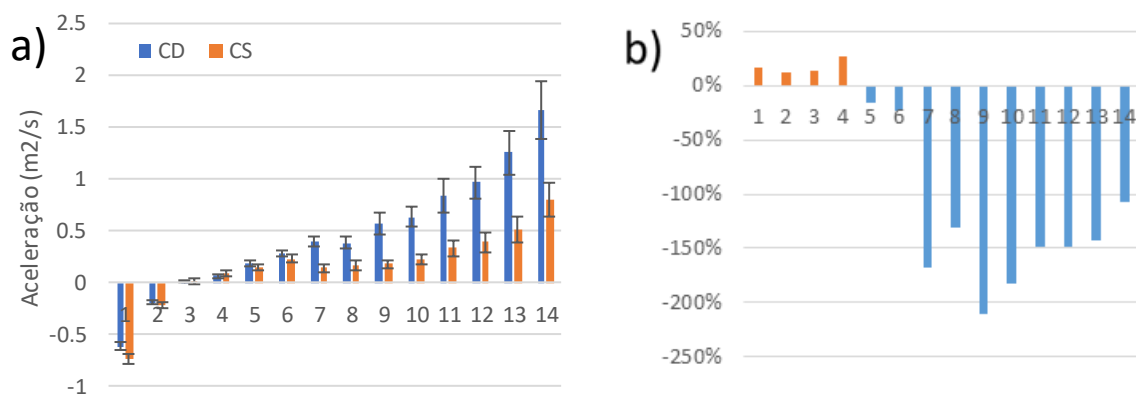


Figura 4-27 – Veículo B: a) Aceleração por modo VSP (m/s^2); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)

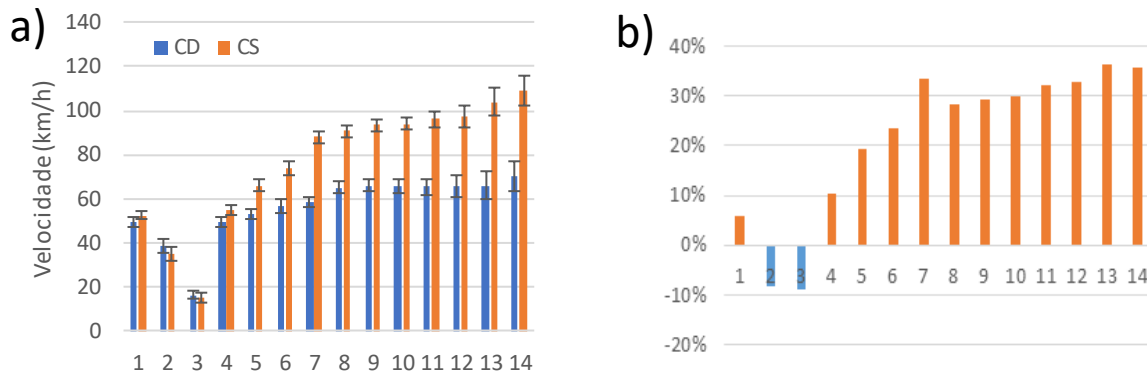


Figura 4-28 – Veículo B: a) Velocidade por modo VSP (km/h); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)

Tal como se verifica no **veículo A**, a **Figura 4-27** demonstra que em geral a aceleração em CD é superior do que em CS, contrariamente ao observado com a velocidade (**Figura 4-28**). A aceleração em CD é superior desde o modo 5 até ao modo 14, sendo que aumenta de forma praticamente linear com o aumento do modo VSP. Em relação à velocidade, verifica-se que em CS durante todos os modos de VSP à exceção do 2 e do 3. Em CD o valor da velocidade a partir do modo 8 não varia muito, e parece manter-se praticamente constante em torno do 65 km/h. Já para o caso das viagens em CS, o valor parece ser constante desde o modo 8 até ao modo 12, sendo nos últimos 2 modos caracterizados por um aumento da velocidade média. Pode concluir-se que a velocidade em CD não é o fator dominante na determinação do VSP instantâneo, sendo a aceleração o fator com maior impacte.

O consumo de gasolina em L/100km está na **Figura 4-29**.

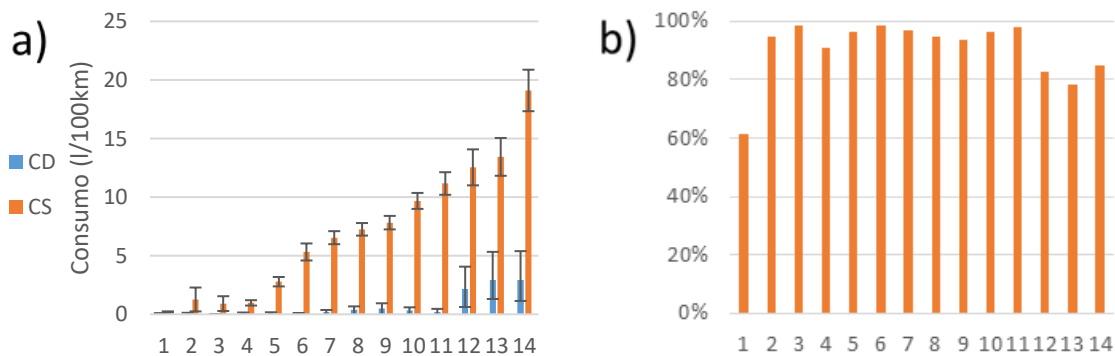


Figura 4-29 – Veículo B: a) Consumo de gasolina (l/100km); b) diferença relativa em percentagem (CS-CD)

O **veículo B** apresenta consumos médios por modo de VSP bastante reduzidos em CD quando comparados com CS, como é possível verificar na **Figura 4-29**. Pode concluir-se que o veículo funciona como um EV na grande maioria do tempo, recorrendo apenas ao ICE em modos mais elevados de VSP.

Em relação ao tempo de ativação do ICE no **veículo B**, a informação será demonstrada na Figura 4-30.

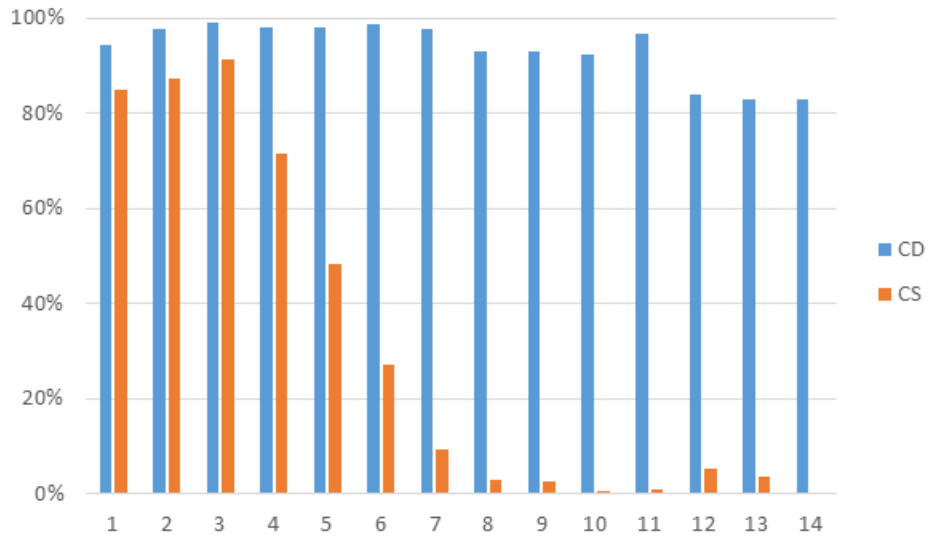


Figura 4-30 – Percentagem de tempo com ICE desativado (veículo B)

Tal como a informação da **Figura 4-29** sugere, a ativação do motor térmico em CD é bastante reduzida. O ICE em CD esteve desativado em 96% do tempo. Na **Figura 4-30** verifica-se para todos os modos de VSP um tempo de desativação superior a 80%, sendo esse tempo ligeiramente mais reduzido nos modos 12, 13 e 14, devido à maior necessidade de potência. Em CS a participação do ICE na propulsão do veículo é reduzida nos modos mais baixos de VS, começando a aumentar progressivamente a partir do modo 4. No total o ICE esteve desativado em 50% do tempo (menos 9% face ao **veículo A**), no entanto para modos de VSP, o **veículo B** utilizou o ICE mais frequentemente que o **veículo A**, o que indica que o **veículo B** recorre ao EM sobretudo em arranques em CS, sendo a sua participação menos influente para deslocações em altas potências.

Em termos globais, o consumo em MJ/s em CD está representado na **Figura 4-31**.

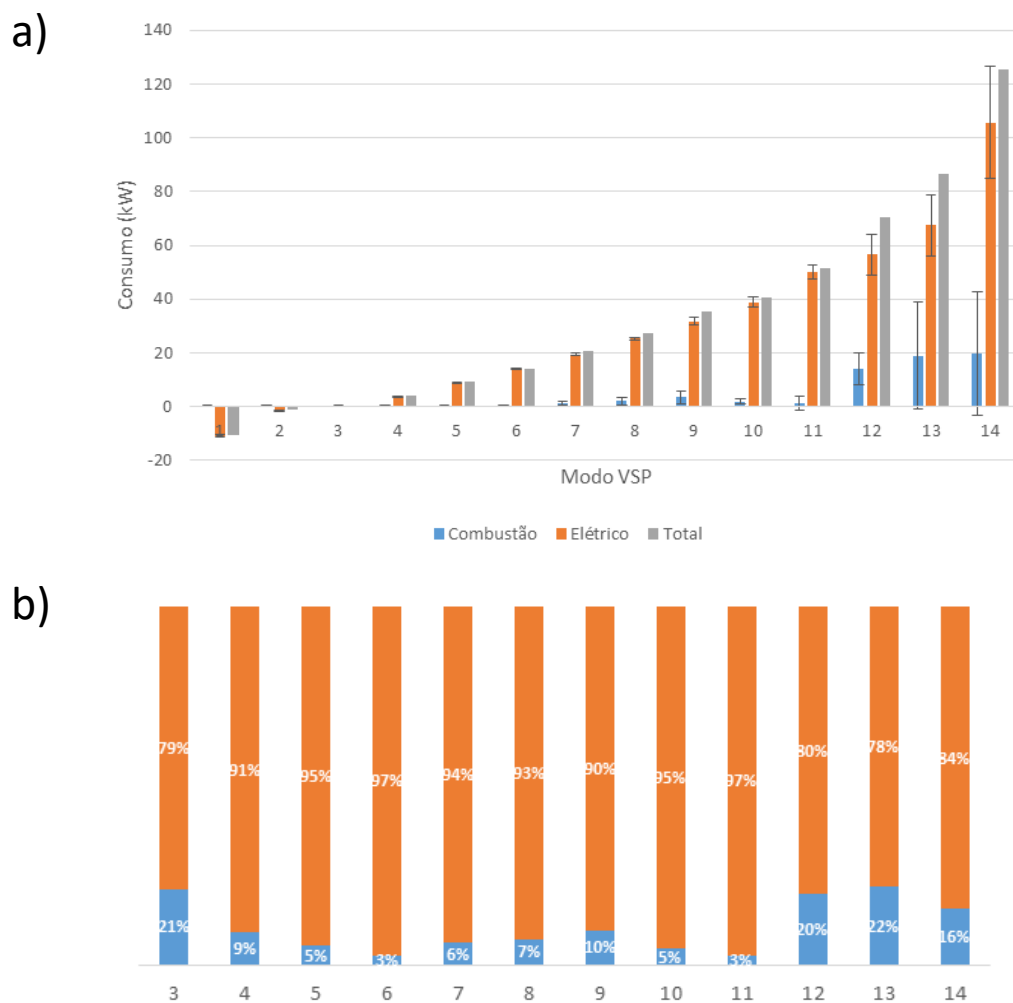


Figura 4-31 – Consumo global do veículo B em CD: a) consumo por motor (MJ/s) (em cima); b) fração do consumo total de energia consumida por motor (em baixo)

Como se verifica na **Figura 4-31**, a participação do ICE no consumo global de energia para a fase CD do **veículo B** é bastante reduzida quando comparada com o consumo do EM. No total das viagens em CD, 13% do consumo energético foi originado por combustão sendo os restantes 87% relativos ao consumo elétrico. Entre o modo 4 e 11 o consumo de gasolina não ultrapassou os 10% do consumo global energético, sendo apenas superior nos modos 12, 13 e 14 (20%, 22% e 16% respetivamente). Nos modos de VSP 1 e 2, o **veículo B** permitiu uma recuperação estimada de 2373 kWh (34% da capacidade utilizável da bateria, 27% da capacidade total) durante a primeira viagem e 2248 kWh (32% da capacidade utilizável da bateria, 26% da capacidade total).

O rendimento estimado em cada modo de VSP é demonstrado na **Figura 4-32**.

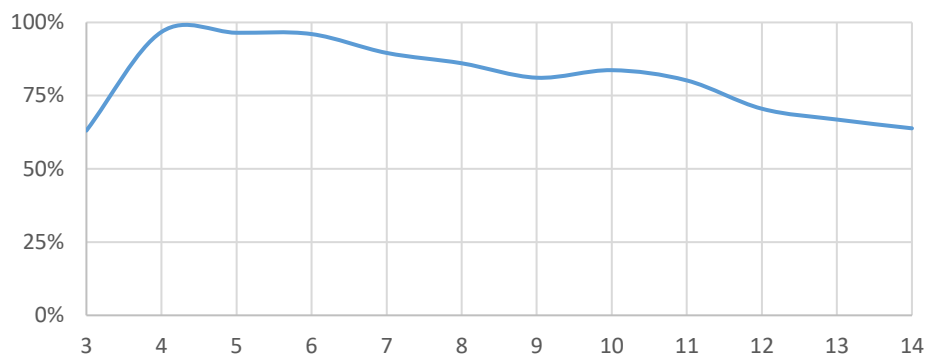


Figura 4-32 – Rendimento dos motores (EM + ICE) por modo VSP em CD

A **Figura 4-32** demonstra que o rendimento atinge o seu pico no modo 4, decrescendo para os modos de maior potência. No global, o rendimento dos motores do **veículo B** durante a fase CD foi de 72%. Tal como a tendência observada para o **veículo A**, os valores do rendimento estão intimamente ligados com a participação do ICE na propulsão do veículo, sendo o rendimento menor quanto maior for a componente térmica da energia consumida.

Em termos de emissões médias de poluentes locais por modo VSP e os respetivos intervalos de confiança, a informação encontra-se sintetizada na **Tabela 4-5**.

A **Tabela 4-5** demonstra as emissões de CO, HC e NO_x das viagens do **veículo B**. Em relação ao CO, as emissões foram bastante dispares em CD e CS. Apesar das emissões por segundo em CD na maior parte dos modos ser consideravelmente maior nos modos mais baixos de VSP, as emissões nos modos 8, 9 e 14 são bastante mais elevadas, sendo no modo mais alto 684% superiores quando comparadas com as emissões por segundo em CS. No entanto, deve ter-se em conta que o tempo de viagem no modo 14 em CD foi muito reduzido, o que demonstra que os picos de aceleração e a ativação/desativação do ICE são os principais responsáveis pelas emissões de CO. Em relação aos HC, é visível uma tendência semelhante, sendo as emissões em modos mais baixos de VSP menores para CD e para os modos mais altos ocorre a inversão da tendência. Quanto aos NO_x verificam-se algumas diferenças face aos outros poluentes emitidos, sendo o pico de emissões em CD no modo 9, apesar de existir uma grande variabilidade nas emissões desse modo. À semelhança do verificado no **veículo A**, as emissões de CO₂ não foram representadas graficamente por seguirem a tendência dos consumos de gasolina.

Tabela 4-5 – Emissões locais por modo VSP (Veículo B): Valores médios e intervalos de confiança 95% (t-student)

	CO ₂				CO				HC				NO _x			
	CD		CS		CD		CS		CD		CS		CD		CS	
	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf	média	int conf
1	0.03	0.01	0.07	0.02	1.1E-05	9.2E-06	1.8E-05	7.5E-06	8.0E-06	6.4E-06	1.9E-06	9.7E-07	1.7E-05	8.4E-06	1.8E-05	6.5E-06
2	0.02	0.01	0.06	0.02	2.3E-05	3.9E-05	2.1E-05	1.1E-05	3.7E-06	3.8E-06	2.3E-06	1.3E-06	1.2E-05	1.3E-05	8.9E-06	4.6E-06
3	0.01	0.01	0.05	0.02	1.2E-06	2.3E-06	1.5E-05	5.9E-06	2.1E-08	4.1E-08	1.6E-06	6.6E-07	2.5E-06	2.5E-06	5.4E-06	2.3E-06
4	0.03	0.01	0.32	0.06	3.2E-05	3.0E-05	7.3E-05	1.8E-05	7.1E-06	8.0E-06	6.7E-06	2.1E-06	1.2E-05	1.1E-05	6.5E-05	1.6E-05
5	0.03	0.02	0.95	0.10	2.1E-04	2.6E-04	2.2E-04	4.5E-05	1.1E-05	1.1E-05	1.9E-05	4.3E-06	2.0E-05	1.6E-05	1.7E-04	4.9E-05
6	0.03	0.02	1.86	0.14	8.9E-06	9.2E-06	4.4E-04	6.3E-05	5.9E-06	6.4E-06	3.5E-05	6.2E-06	1.3E-05	1.3E-05	3.9E-04	8.5E-05
7	0.09	0.08	3.10	0.16	2.7E-04	4.5E-04	1.1E-03	3.2E-04	1.6E-05	2.1E-05	6.7E-05	1.0E-05	2.8E-05	3.0E-05	5.7E-04	9.0E-05
8	0.13	0.08	3.74	0.16	2.3E-03	3.0E-03	1.5E-03	3.7E-04	8.5E-05	7.3E-05	1.2E-04	4.5E-05	7.2E-05	5.0E-05	6.2E-04	6.9E-05
9	0.23	0.20	4.22	0.19	4.2E-03	7.6E-03	1.5E-03	2.9E-04	5.6E-05	5.6E-05	9.1E-05	1.4E-05	2.1E-03	4.0E-03	8.9E-04	2.1E-04
10	0.13	0.11	5.27	0.23	4.6E-04	6.1E-04	2.6E-03	6.4E-04	9.2E-06	1.0E-05	1.7E-04	7.3E-05	5.8E-05	5.6E-05	9.6E-04	1.4E-04
11	0.10	0.13	6.41	0.35	1.4E-04	2.7E-04	3.6E-03	1.1E-03	4.5E-05	8.1E-05	2.2E-04	5.8E-05	6.0E-05	1.1E-04	1.0E-03	2.4E-04
12	0.94	0.83	7.47	0.67	2.0E-03	2.2E-03	5.4E-03	3.3E-03	1.3E-03	1.4E-03	5.0E-04	3.2E-04	6.2E-04	7.0E-04	1.3E-03	3.3E-04
13	1.27	1.03	8.70	0.90	3.6E-03	4.2E-03	8.7E-03	6.6E-03	9.3E-04	8.4E-04	3.2E-04	1.5E-04	1.7E-03	1.8E-03	1.3E-03	2.5E-04
14	1.26	1.09	12.82	0.77	4.3E-02	5.5E-02	5.4E-03	1.1E-03	2.1E-03	2.6E-03	3.5E-04	1.2E-04	8.3E-04	1.1E-03	2.5E-03	3.4E-04

4.5. Avaliação de impactes por distância percorrida

As viagens realizadas para a realização deste trabalho ofereceram uma grande variedade de condições de condução devido às diferentes fases dos trajetos realizados. Dessa forma, as condições das viagens de teste estabelecem um perfil de viagem abrangente que permite uma análise global de impactes por distância percorrida. Com os dados apresentados nas secções 4.3 e 4.4 torna-se possível traçar o perfil médio das emissões e consumos de ambos os veículos em CD e CS. Para cada veículo, e assumindo um início de viagem com a bateria totalmente carregada, é possível realizar uma análise de impactes por distância média de viagem, abordando consumos energéticos (gasolina e elétrico) e emissões de poluentes. Esta avaliação permite não só uma estimativa quantitativa de impactes para os automóveis estudados, como também qualificar a importância do carregamento do **veículo A** e **veículo B** e qual a distância diária ideal entre carregamentos.

Para as duas viagens realizadas por cada um dos veículos de estudo, os consumos médios foram os apresentados na **Tabela 4-6**:

Tabela 4-6 – Consumo de gasolina e emissões de poluentes locais para as viagens realizadas pelo veículo A e veículo B

		gasolina	CO ₂	CO	HC	NO _x
		l/100 km	g/km			
Veículo A	CD	2.8	64.6	1.01	2.0E-02	1.8E-02
Veículo B		0.2	4.5	3.8E-02	2.9E-03	6.2E-03
Veículo A	CS	7.3	171	6.3E-01	1.8E-03	2.0E-02
Veículo B		4.3	103	4.5E-02	3.0E-03	1.9E-02

Os dados da **Tabela 4-6** correspondem ao total de gasolina consumida e poluentes locais emitidos divididos pela distância total percorrida durante as viagens dos dois veículos. Não correspondem a uma média, mas sim à divisão de dois somatórios, pelo que não existe um desvio padrão associado.

Com a informação da **Tabela 4-6** é possível calcular os consumos absolutos e por cada 100 km de viagem entre dois carregamentos. Através da análise feita previamente em 4.3 e 4.4 verificou-se uma quilometragem média em depleção de 39.4 km para o **veículo A** e de 43.8 km para o **veículo B**. Os resultados apresentam-se na **Figura 4-33**.

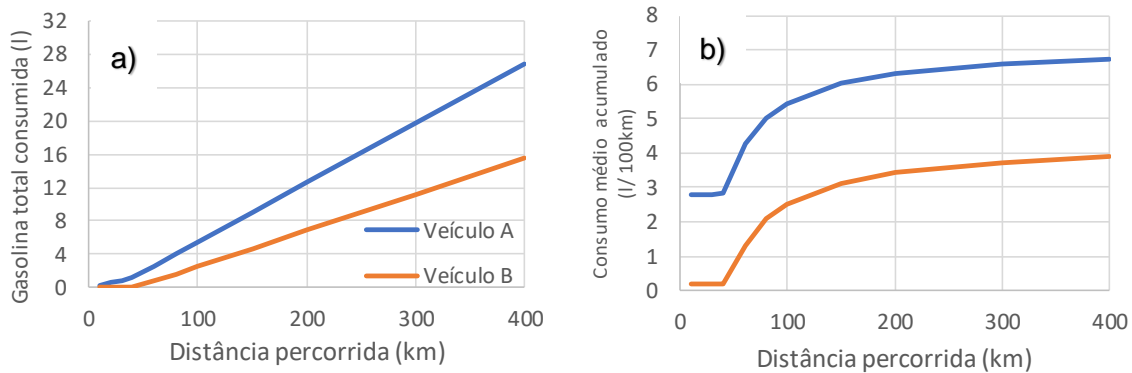


Figura 4-33 - Consumo de combustível por distância total de viagem: a) consumo total; b) consumo médio acumulado

A **Figura 4-33** permite quantificar os impactos da extensão das viagens realizadas por um utilizador dos veículos de estudo. Como é possível verificar, os consumos intensificam-se bastante para viagens que ultrapassem a autonomia elétrica do veículo. Para o **veículo A** o consumo é 2.6 vezes maior em CS face a CD. Para uma utilização mais económica deste veículo a distância percorrida diariamente deve ser menor que 40 km, garantindo uma utilização meramente em CD. Quando comparado com o veículo compacto recomendado para 2020 pela revista *Autoexpress* [48] (consumo médio registado de 6.41 l/100 km [49]), o **veículo A** permite uma poupança perto dos 4.0 l/100km se utilizado sempre em CD. No entanto, a vantagem económica do **veículo A** começa a diminuir a partir dos 40 km percorridos, chegando a ser a pior opção face ao veículo pouco após os 300 km percorridos entre carregamentos. O **veículo B**, apresenta uma poupança de perto de 6.5 l/100km se funcionar em CD durante todo o tempo. Apesar de em CS o **veículo B** consumir 20.5 vezes mais que na fase CD, permite sempre uma poupança face ao veículo convencional, oferecendo no pior dos cenários uma poupança de 2.3 l/100km.

A mesma análise foi feita em relação aos poluentes emitidos, estando os resultados apresentados na **Figura 4-34**.

A **Figura 4-34** demonstra que as emissões de CO₂ seguem um padrão semelhante ao consumo de gasolina. O **veículo A** emite mais CO durante a fase CD, havendo por isso uma diminuição gradual da média de consumo após os 40 km, sendo que no **veículo B** as emissões de CO são praticamente constantes durante toda a extensão da viagem, havendo um aumento muito ténue nas emissões após os 40 km. Em relação às emissões de HC, o **veículo A** produz também uma maior taxa deste poluente em CD, havendo por isso uma diminuição da média de emissão de HC com o aumentar dos km percorridos. O **veículo B** apresenta uma emissão de HC ligeiramente superior em CS. Por fim no **veículo A**, em relação aos NO_x ocorre um ligeiro aumento na emissão com o aumentar da quilometragem, devido à menor emissão durante a fase CD. Para o **veículo B**, existe uma maior diferença nas taxas emitidas em CD e CS, havendo dessa forma um aumento maior da média de NO_x emitido em função da quilometragem.

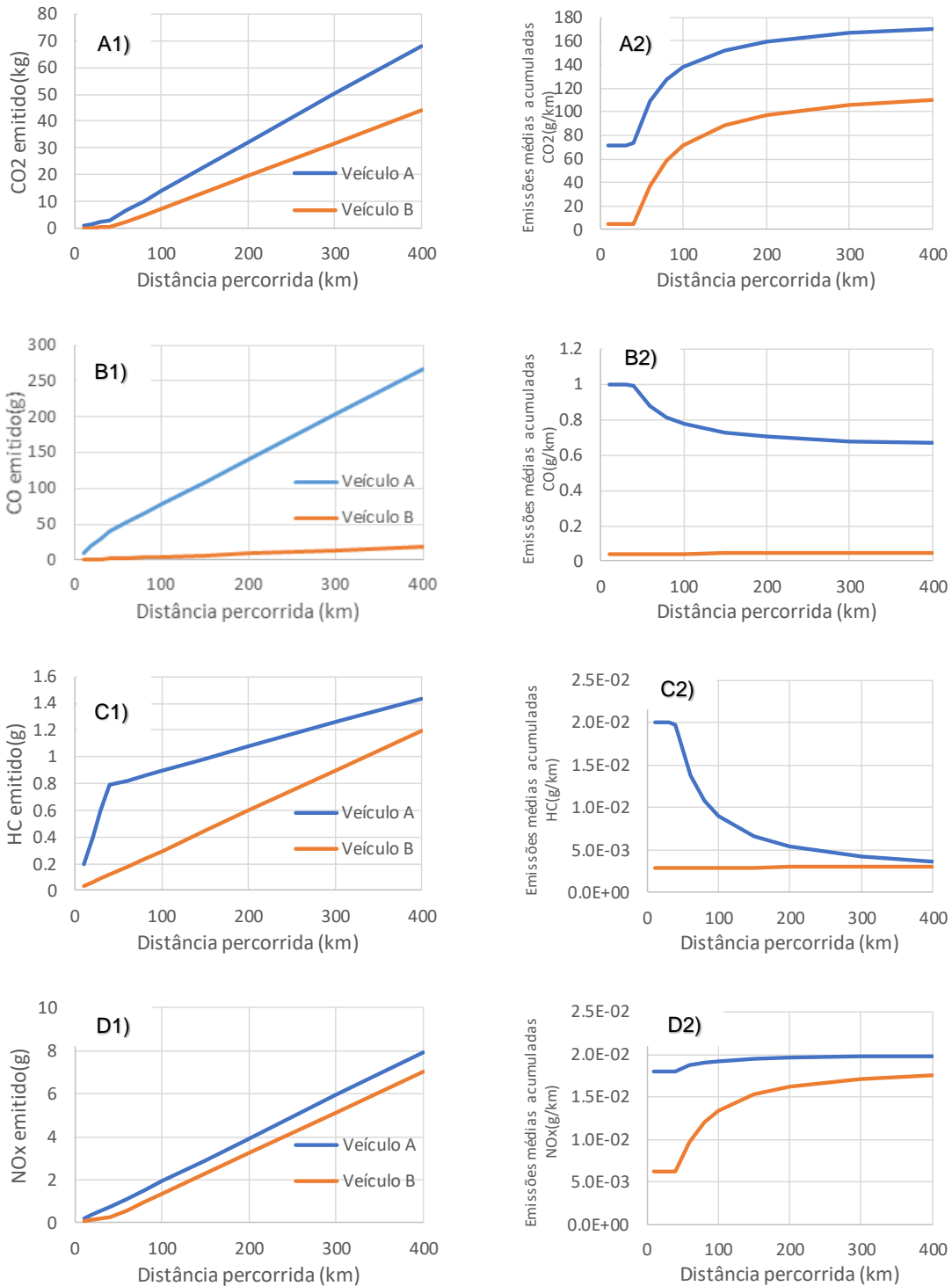


Figura 4-34 - Emissões de poluentes locais (1- emissões totais; 2- emissões médias acumuladas) – a) CO₂, b) CO, c) HC, d) NO_x

As normas europeias de emissões de CO₂, definidas no início de 2019 estabelecem como meta uma redução de 15% para 2025 e de 37.5% para 2030, com base nos valores obtidos em 2021[48]. Atualmente, a média de CO₂ emitida ronda os 120 g/km para a frota automóvel europeia e a meta para 2021 é de 95 g/km [48]. O **veículo A** emite em média durante a fase CD 64.6 g/km de CO₂, sendo que em CS esses valores sobem para os 171 g/km. Dessa forma, se o percurso realizado pelo **veículo A**

entre dois carregamentos for até 80 km, as emissões de CO₂ serão inferiores à média global da frota automóvel europeia. Já o **veículo B** apresenta valores em CD e CS inferiores à média europeia, sendo por isso sempre uma opção mais favorável no que toca às emissões de CO₂ independentemente do percurso percorrido entre dois carregamentos. Em relação aos restantes poluentes (CO, HC e NO_x), existem normas da União Europeia (UE) que definem valores limite de emissão para veículos de passageiros a gasolina (Euro 6). Para CO, o limite estabelecido é de 1g/km, para os HC 0.10 g/km e para os NO_x 0.06 g/km [50]. Os valores emitidos pelo **veículo A** e pelo **veículo B** encontram-se consideravelmente abaixo das normas europeias, à exceção do CO. O CO apresenta uma maior emissão durante a fase CD do **veículo A**, estando ligeiramente acima do valor tabelado pela UE, no entanto, a partir dos 40 km de viagem os valores médios emitidos diminuem e passam a ser abaixo da norma.

4.6. Avaliação de impactes da frequência de carregamento

Na secção 4.5 é avaliado o impacte da distância percorrida entre carregamentos em termos de consumos de gasolina e emissões de poluentes locais, abrindo precedente para a avaliação dos impactes da frequência de carregamento. O carregamento frequente permite a melhor utilização quer em termos energéticos, quer em termos financeiros. No entanto, o utilizador pode não ter um acesso fácil a um posto de carregamento.

A análise de impactes da frequência de carregamento é importante para quantificar e definir uma utilização ótima de um PHEV, quer do ponto de vista quer do ponto de vista de consumos e emissões locais, como do ponto de vista financeiro para o utilizador.

Segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE), na Área Metropolitana de Lisboa a distância média percorrida por cada deslocação pelos habitantes é de 10.3 km divididos por uma média de 2.6 viagens/dia (números de 2017 [51]). Foi estudado o impacte da frequência de carregamento para o **veículo A** e o **veículo B**, tendo como base os consumos e emissões apresentados em 4.5 e os preços médios atuais de gasolina e eletricidade (gasolina 95 Simples: 1.55€/l [52]).

Foram considerados 6 intervalos de tempo entre carregamentos: **2 vezes por dia, 1 vez por dia, 2 em 2 dias, 3 em 3 dias, 4 em 4 dias, 5 em 5 dias, 6 em 6 dias e 7 em 7 dias**. Para cada uma das periodicidades de carregamento foi considerada uma distância média percorrida, consoante os valores revelados pelo INE, estando a informação resumida na **Tabela 4-7**.

Tabela 4-7 - Distância percorrida em função da frequência de carregamento

carregamento	2 x dia	1 x dia	2 em 2 dias	3 em 3 dias	4 em 4 dias	5 em 5 dias	6 em 6 dias	7 em 7 dias
Distância entre carregamentos (km)	13.4	26.8	53.6	80.3	107.1	133.9	160.7	186.5

De forma a avaliar o desempenho do **veículo A** e do **veículo B**, os valores estimados de emissões de poluentes locais e de consumo de gasolina foram comparados com os valores do veículo convencional mais vendido de 2019. A **Tabela 4-8** apresenta resumidos os seus valores de referência:

Tabela 4-8 - Dados de emissões e consumo do veículo convencional mais vendido em 2019 (Portugal)[53]

Gasolina (l/100km)	CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)
5.0	113	0.667	0.044	0.021

Gasolina e eletricidade – consumo e custo

Em termos de consumo de gasolina, os veículos apresentam o perfil de consumo e respetivo custo em função da frequência de carregamento demonstrado na **Figura 4-35**.

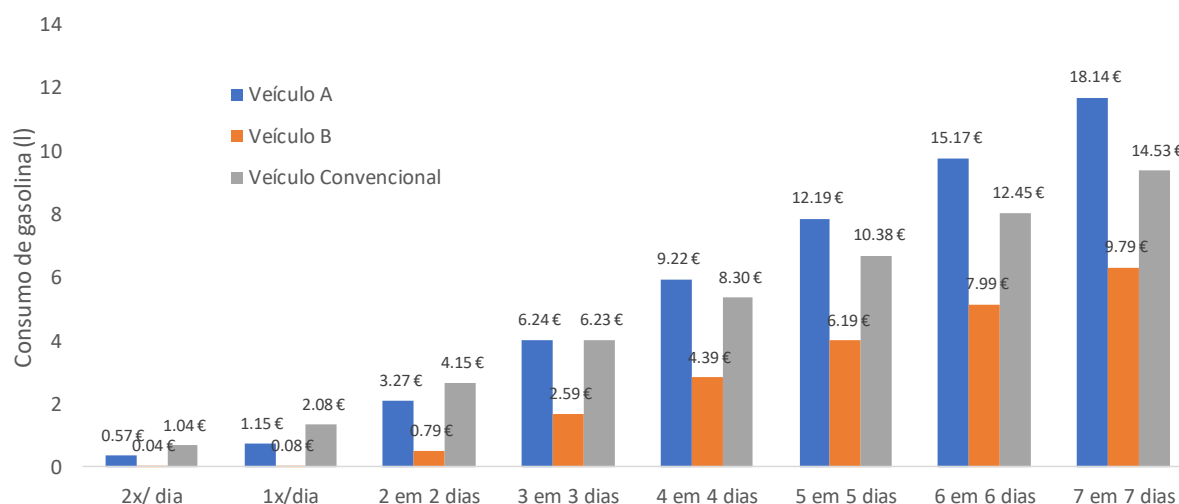


Figura 4-35 - Consumo e custo acumulado da gasolina em função da frequência de carregamento

Na **Figura 4-35** pode verificar-se que o **veículo A** apresenta uma vantagem no ponto de vista da economia de gasolina face ao veículo convencional se o tempo entre dois carregamentos não exceder os 3 dias. Se o utilizador não tiver oportunidade de carregar o **veículo A** com regularidade, este passa a ser pouco competitivo economicamente, uma vez que o seu consumo de gasolina é bastante elevado em CS. Em relação ao **veículo B** verifica-se que apresenta uma vantagem económica para todo o espetro de carregamento, sendo essa vantagem mais evidente para carregamentos mais frequentes.

Recorrendo à descrição feita na secção **3.5.1** acerca das modalidades de carregamento de veículos elétricos obteve-se os custos representados na **Tabela 4-9**. De forma a complementar e ilustrar a informação da **Tabela 4-9** foi feito uma representação gráfica do custo da gasolina e eletricidade por cada km/percorrido para o **veículo A**, **veículo B** e veículo convencional (**Figura 4-36**).

Tabela 4-9 - Custos totais de combustível e eletricidade consoante a frequência de carregamento: a) Veículo A; b) Veículo B

a)	Custo elétrico (€)	Custo combustível (€)	% custo elétrico	Dias entre carregamentos
Carregamento rápido (fora de casa)	0.90 €	0.57 €	61%	0.5
	1.61 €	1.15 €	58%	1
	2.28 €	3.27 €	41%	2
	2.28 €	6.24 €	27%	3
	2.28 €	9.22 €	20%	4
	2.28 €	12.19 €	16%	5
	2.28 €	15.17 €	13%	6
	2.28 €	18.14 €	11%	7
Carregamento lento (em casa)	0.48 €	0.57 €	45%	0.5
	0.95 €	1.15 €	45%	1
	1.40 €	3.27 €	30%	2
	1.40 €	6.24 €	18%	3
	1.40 €	9.22 €	13%	4
	1.40 €	12.19 €	10%	5
	1.40 €	15.17 €	8%	6
	1.40 €	18.14 €	7%	7

b)	Custo elétrico (€)	Custo combustível (€)	% custo elétrico	Dias entre carregamentos
Carregamento rápido (fora de casa)	0.87 €	0.04 €	96%	0.5
	1.56 €	0.08 €	95%	1
	2.44 €	0.79 €	76%	2
	2.44 €	2.59 €	49%	3
	2.44 €	4.39 €	36%	4
	2.44 €	6.19 €	28%	5
	2.44 €	7.99 €	23%	6
	2.44 €	9.79 €	20%	7
Carregamento lento (em casa)	0.46 €	0.04 €	92%	0.5
	0.92 €	0.08 €	92%	1
	1.51 €	0.79 €	66%	2
	1.51 €	2.59 €	37%	3
	1.51 €	4.39 €	26%	4
	1.51 €	6.19 €	20%	5
	1.51 €	7.99 €	16%	6
	1.51 €	9.79 €	13%	7

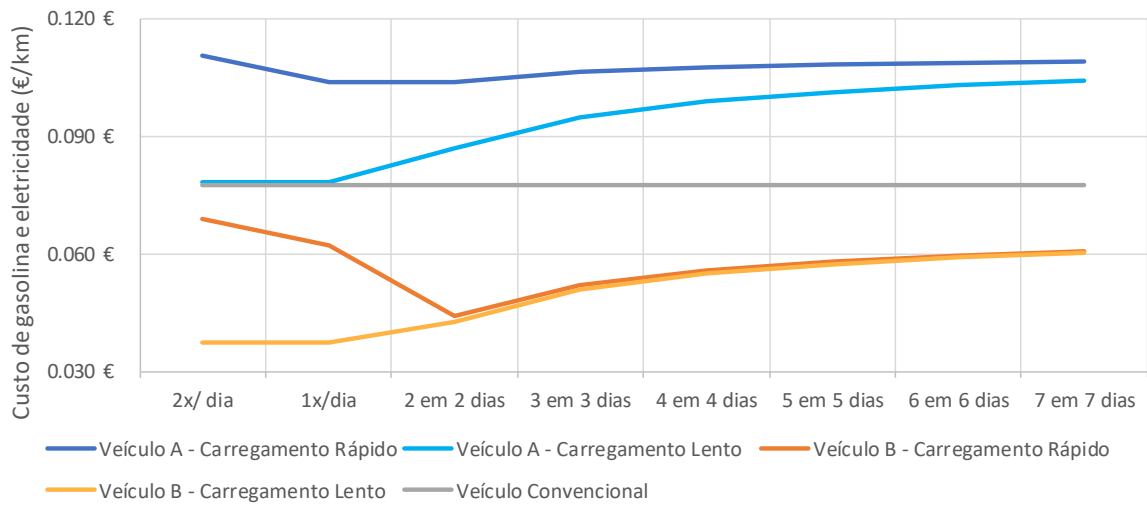


Figura 4-36 – Custo por km percorrido (gasolina e eletricidade), tendo em conta a frequência e o tipo de carregamento

Como se pode observar na **Figura 4-36** a melhor opção estudada é a do carregamento em casa. No entanto, com o aumento do período entre carregamentos essa vantagem esbate-se, sendo inclusivamente praticamente nula a partir do carregamento de 3 em 3 dias no **veículo B**. Para um período entre carregamentos entre 0.5 a 2 dias a opção pelo carregamento rápido é a menos indicada no ponto de vista económico quer para o **veículo A**, quer para o **veículo B**. Num cenário de carregamento lento diário ou bi-diário as vantagens são semelhantes, pelo que o carregamento bi-diário só compensa em situações onde o utilizador tem um tempo reduzido de carregamento ou necessite de realizar uma deslocação excecional. O veículo menos indicado economicamente é o **veículo A**, que para qualquer tipo de carregamento é a opção mais cara. O **veículo B** é a opção mais barata e apresenta uma vantagem competitiva mesmo tendo em consideração os dois tipos de carregamento. O veículo convencional apresenta uma média de 0.078€/km, sendo por isso a opção intermédia no que toca à economia de energia.

Uma das variáveis a ter em conta em relação aos resultados obtidos na **Figura 4-36** e **Tabela 4-9** é que o custo dos carregamentos em casa é bastante variável, consoante a hora a que o carregamento for feito. Os preços de eletricidade em Portugal para utilizadores da BTN variam desde os 0.1073€/kWh em horas de vazio e os 0.2273 €/kWh em horas de ponta [42]. Caso o utilizador tenha possibilidade de carregar em horas de vazio pode poupar cerca de 50% do valor total de energia face ao custo médio da eletricidade em Portugal.

Deve também ressaltar-se que opções de carregamento gratuito não foram consideradas, o que poderá levar a custos mais reduzidos para os PHEV. Para utilizadores que tenham acesso a postos de carregamento no seu local de trabalho ou a postos de carregamento gratuitos disponíveis em algumas zonas do país[43], as despesas de eletricidade relativas ao carregamento podem ser reduzidas e tornar a opção por um PHEV ainda mais atrativa.

Com a **Figura 4-36** verificamos que dentro do universo dos PHEV os consumos e custos associados são bastante diferentes, sendo que nem sempre a opção por um destes veículos é compensatória face aos veículos convencionais no que toca à diminuição dos custos operacionais, porém, estes resultados demonstram apenas o impacto de duas possibilidades de carregamento num espetro bastante alargado. Muitos utilizadores têm acesso a carregadores no seu local de trabalho, podendo inclusivamente fazer uma utilização do veículo sem custos de eletricidade associados. Dessa forma, não apenas o consumo de eletricidade e gasolina devem ser estudados, como também o acesso e disponibilidade de carregamento.

Emissões de poluentes locais

Foi também realizada uma comparação das emissões de poluentes locais dos 3 veículos em consideração. As emissões de CO₂, CO, HC e NO_x encontram-se compiladas na **Figura 4-37**.

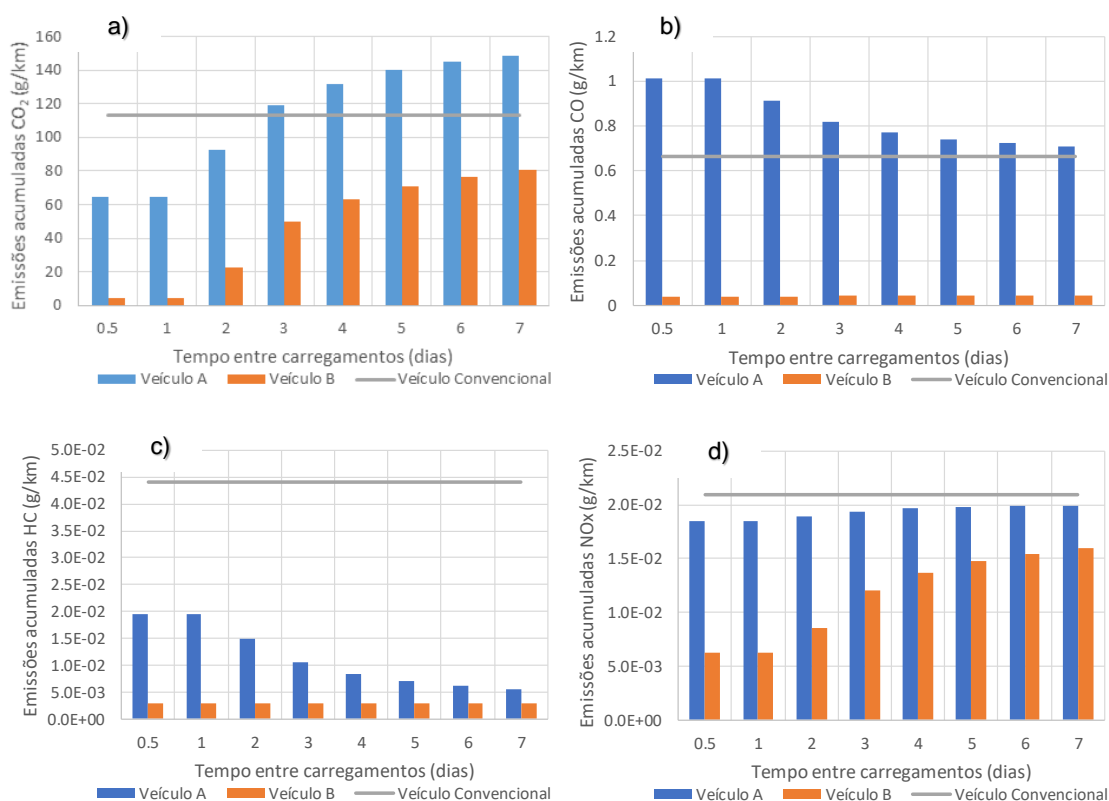


Figura 4-37 - Emissões de poluentes locais em função da frequência de carregamento; a) CO₂; b) CO; c) HC; d) NO_x

As emissões de CO₂ seguem um padrão semelhante ao do consumo de gasolina. Pode verificar-se que o **veículo B** apresenta valores de emissão sempre mais baixos que o veículo convencional e o **veículo A** apresenta valores mais baixos caso o tempo entre carregamentos seja curto, ocorrendo a inversão dessa tendência a partir do carregamento de 3 em 3 dias, tal como se verifica com o consumo

de gasolina. Em relação ao CO, as emissões são mais elevadas em todo o espectro da frequência de carregamento do **veículo A** quando comparado com o veículo convencional e as emissões do **veículo B** são bastante inferiores para todos os cenários de carregamento (mais de 10 vezes inferiores). Em termos de HC, o veículo convencional emite mais do que qualquer um dos veículos estudados, sendo que as diferenças são ainda maiores quando o carregamento é menos frequente. Quanto aos valores de NO_x, as emissões são bastantes semelhantes para o **veículo A** e para o veículo convencional, sendo ligeiramente maiores no veículo convencional. Para o **veículo B** as emissões de NO_x são também mais baixas que as dos restantes veículos, havendo, no entanto, uma aproximação destes valores com o aumento da frequência de carregamento.

5. Conclusões e trabalho futuro

Com o objetivo de avaliar a estratégia de gestão de energia de dois PHEV, foram usadas duas viagens em dois veículos que permitiram a avaliação de toda a extensão da autonomia da bateria, considerando o período de depleção e sustentação de carga. Recorreu-se à metodologia VSP que permitiu a divisão de cada instante da viagem em 14 diferentes modos tendo em conta os valores segundo a segundo de aceleração, velocidade e declive. Foram também desenvolvidos modelos que permitiram prever o funcionamento do motor térmico, a variação de SOC e conseqüentemente consumo elétrico. Por fim foi elaborada uma matriz de funcionamento genérica para PHEV, que possibilitou o agrupamento de dados consoante os motores utilizados na propulsão do veículo em cada instante da fase CD.

O modelo de previsão de funcionamento do ICE contribuiu para a identificação de condições dinâmicas de condução, que levam à ativação do ICE durante o período CD. É um modelo versátil porque pode ser aplicado a qualquer PHEV. O modelo foi desenvolvido com uma precisão de 73% para o **veículo A** e 83% para o **veículo B** e define que o ICE é ativado caso cada veículo esteja sujeito a um valor médio de VSP superior a 20.8 W/kg para o **veículo A**, e 24.0 W/kg para o **veículo B** durante 15 segundos e é desativado caso o valor médio de VSP durante 5 segundos seja inferior a -9.0 W/kg no **veículo A**, e -15.0 W/kg para o **veículo B**, demonstrando que o **veículo A** depende mais do ICE.

A matriz de funcionamento definida neste trabalho teve como propósito a divisão dos instantes da viagem consoante os motores em ação segundo a segundo, fornecendo uma forma renovada de organizar os dados iniciais. A matriz permitiu uma análise mais completa dos PHEV em CD, avaliando o impacto global de cada modo de propulsão dos veículos. Tal como os restantes modelos desenvolvidos neste trabalho, a matriz de funcionamento pode ser aplicada a qualquer PHEV. O **veículo A** percorreu 27% da fase CD com o ICE ativado e o **veículo B** 4%. A maior utilização do ICE por parte do **veículo A** levou a um consumo de gasolina global maior que o **veículo B** (2.2 l/100km e 0.2 l/100km respetivamente). Foi possível verificar que o **veículo A** usa o ICE exclusivamente nos momentos onde a potência requerida é maior (zona C com VSP médio de 16 W/kg) e no **veículo B** a potência máxima é obtida quando os dois motores se encontram em funcionamento simultaneamente (Zona E com VSP médio de 18.6 W/kg). O **veículo A** emitiu mais poluentes locais (ex: CO₂ 64 g/km, CO 1.0 g/km) que o **veículo B** (ex: CO₂ 4.5 g/km, CO 0.038 g/km). Considerando apenas os momentos onde o ICE se encontrava ativado, o consumo médio de gasolina foi de 10.1 l/100km para o **veículo A** e 4.4 para o **veículo B**. Como o tempo de atividade do ICE do **veículo B** os impactos dos arranques do motor têm mais peso na média de emissões de poluentes locais, sendo que apesar do consumo de gasolina do ICE do **veículo B** ser menor, este emitiu maiores quantidades de NOx.

A análise por modo VSP permitiu verificar que ambos os veículos recorreram ao ICE nos modos mais elevados de potência. Em CD o **veículo A** funcionou 85% do tempo sem recorrer ao ICE nos modos 1 a 5 e atingiu o seu pico de funcionamento no modo 13 (apenas 3% do tempo desativado). O **veículo B** teve o ICE desativado mais de 95% do tempo entre os modos 1 e 11, havendo uma diminuição desse valor para os 83% nos modos 12, 13 e 14. EM CS o **veículo B** também recorreu menos ao seu ICE que o **veículo A** (ICE desativado em 42% do tempo no **veículo A** e 50% no **veículo B**). Verificou-se

também que o **veículo A** recorreu ao EM para converter 35% da energia total consumida na propulsão em CD e o **veículo B** 87%.

Com a avaliação de impactes por distância percorrida foi possível quantificar os impactes da utilização do **veículo A** e do **veículo B**. Foram utilizados como base os dados das viagens teste realizadas, uma vez que os trajetos percorridos incluíam vários tipos de condução permitindo uma análise mais abrangente. O **veículo A** quando totalmente carregado e utilizado numa distância até 55 km cumpre as metas de emissão para 2021 de 95 g/km de CO₂ (consumo acumulado de 94.8 g/km), no entanto os valores sobem bastante quando a distância percorrida em CS aumenta. O **veículo B** emite menos CO₂ que a média emitida por cada automóvel a nível mundial em todo o espetro de distância percorrida (entre 4.5 g/km e 103 g/km), sendo que apenas perto dos 200km percorridos a emissão média acumulada é superior à meta de 2021. Em termos de CO, ambos os veículos os valores emitem abaixo da norma Euro 6 para o CO (1 g/km), à exceção da fase CD do **veículo A** onde os valores emitidos se encontram no limite deste valor. Os valores de HC e NO_x emitidos pelos dois veículos são consideravelmente menores que os valores definidos pela norma Euro 6 (0.1 e 0.06 g/km respetivamente).

A avaliação de impactes da frequência de carregamento permitiu não só comparar os impactes de ambos os automóveis em termos energéticos e ambientais, mas também em termos económicos. O **veículo B** demonstrou ser a melhor opção em termos de economia de energia, sendo o seu custo por quilómetro o menor das opções consideradas mesmo considerando os dois tipos de carregamento estudados (rápido e lento), variando entre os 0.037€/km e os 0.060€/km. O **veículo A** foi a opção menos favorável no geral, apresentando apenas um custo por quilómetro semelhante ao veículo convencional (0.078€/km) quando utilizado o carregamento em casa com uma frequência não superior a 1 dia, variando os seus custos entre os 0.078€/km e os 0.109€/km. O **veículo B** foi também o que apresentou menores valores nas emissões locais de todos os poluentes considerados em comparação com o **veículo A** e o veículo convencional. As emissões de CO₂ acumuladas do **veículo A** passam a ser superiores às do veículo convencional (113 g/km). Em termos de CO, o **veículo A** emite mais que o veículo convencional (0.667 g/km), independentemente do período entre carregamentos. Para o HC e NO_x as emissões são menores no **veículo A**.

Neste trabalho foram apresentados e estudados de uma forma completa todos os fatores ambientais e energéticos a considerar na operação de um PHEV. A metodologia utilizada pode ser aplicada a qualquer outro veículo deste tipo, podendo ser útil para fabricantes e utilizadores. Os dois veículos estudados apresentaram mecanismos de gestão de energia distintos, demonstrando que dentro do universo dos PHEV todas as opções são bastante diferentes. Nem todos os PHEV são a melhor opção face a ICEV, quer a nível financeiro, quer a nível energético e ambiental. Estes veículos são mais atrativos para utilizadores que possuam uma opção de carregamento em casa ou no seu local de trabalho conseguindo assim diminuir os custos da eletricidade consumida.

A utilização do ICE é o principal fator de diferenciação entre estes veículos. A maior dependência do combustível como fonte de propulsão leva a mais arranques a frio do ICE, o que promove picos de consumo e emissões de poluentes locais. O **veículo B** apresentou uma gestão do ICE bastante mais

eficiente que o **veículo A**, permitindo dessa forma uma deslocação mais económica, considerando que quer em CD, quer em CS o consumo foi bastante menor, e com menores impactes ambientais, uma vez que as emissões de poluentes locais foram menores.

Este trabalho permitiu uma abordagem detalhada ao desempenho dos PHEV estudados, analisando dados reais de viagem. Foi possível obter uma imagem global da operação de cada automóvel, mas também analisar cada instante de viagem e qual o impacto da potência requerida segundo a segundo nos consumos e emissões.

5.1. Trabalho futuro

Para efeitos de trabalhos futuros nesta área seria importante obter um conjunto de dados maior através da realização de mais viagens, que permitisse uma melhor caracterização dos impactes globais do PHEV em estudo. O modelo de ativação do ICE teria sido mais preciso caso o conjunto de dados fosse maior e houvesse uma maior variedade de ciclos de condução, expondo os veículos de estudo a condições de viagem mais variadas. Caso este modelo fosse mais preciso, poder-se-ia traçar perfis de condução mais adequados para cada PHEV estudado.

Será também importante este tipo de estudo abranger uma gama maior de PHEV, o que permitirá um aumento do conhecimento ainda limitado da gestão operacional e energética destes automóveis. Este tipo de estudos pode não só permitir aos fabricantes a detetar problemas ao nível dos consumos e emissões com os seus veículos, como também ajudar os utilizadores a usufruírem do seu automóvel de forma mais eficiente e a optarem pela melhor opção numa eventual compra.

6. Referências

- [1] “Home - Eurostat.” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/home?> [Accessed: 27-Jul-2019].
- [2] NationMaster, “All countries compared for Transport & Road & Motor vehicles per 1000 people,” 2014. [Online]. Available: <http://www.nationmaster.com/country-info/stats/Transport/Road/Motor-vehicles-per-1000-people>. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [3] William Todts, “CO2 EMISSIONS FROM CARS: the facts,” 2018.
- [4] “European Environment Agency,” *Choice Reviews Online*, 1999. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/>. [Accessed: 07-Jan-2020].
- [5] M. Weiss, A. Zeffass, and E. Helmers, “Fully electric and plug-in hybrid cars - An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO₂ and air pollutant emissions,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 1478–1489, 2019.
- [6] Till Bunsen Cazzola, Pierpaolo D’Amore, Léa Gorner, Marine Scheffer, “Global EV Outlook 2019 to electric mobility,” *OECD iea.org*, p. 232, 2019.
- [7] “Clean Energy Ministerial - Advancing Clean Energy Together.” [Online]. Available: <http://www.cleanenergyministerial.org/>. [Accessed: 04-Mar-2020].
- [8] “Tens uma empresa? Estes são os benefícios fiscais para as viaturas elétricas e plug-in.” [Online]. Available: <https://www.razaoautomovel.com/2018/12/beneficios-fiscais-eletricas-plug-in>. [Accessed: 05-Jul-2019].
- [9] Lambert Fred, “Electric vehicle battery cost dropped 80% in 6 years down to \$227/kWh – Tesla claims to be below \$190/kWh | Electrek,” *electrek*, 2017. [Online]. Available: <https://electrek.co/2017/01/30/electric-vehicle-battery-cost-dropped-80-6-years-227kwh-tesla-190kwh/>. [Accessed: 05-Jul-2019].
- [10] M. Pourabdollah, B. Egardt, N. Murgovski, and A. Grauers, “Effect of driving, charging, and pricing scenarios on optimal component sizing of a PHEV,” *Control Engineering Practice*, vol. 61, no. 2013, pp. 217–228, 2017.
- [11] European Commission, “Average CO₂ emissions from new light-duty vehicles registered in Europe increased in 2018, requiring significant future emission reductions to meet upcoming 2020 and 2021 targets,” 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/news/average-co2-emissions-new-light-duty-vehicles-registered-europe-increased-2018-requiring_en. [Accessed: 06-Jul-2019].
- [12] P. Plötz, S. Á. Funke, and P. Jochem, “Empirical fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 22, no. 4, pp. 773–784, 2018.
- [13] Christopher Lampton, “What is the history of hybrid cars? | HowStuffWorks.” [Online]. Available:

- <https://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/hybrid-technology/history-of-hybrid-cars.htm>.
[Accessed: 29-Mar-2019].
- [14] “Hybrid Vehicle History - more than a 100 years of evolution and refinement,” 2005. [Online]. Available: <http://www.hybrid-vehicle.org/hybrid-vehicle-history.html>. [Accessed: 29-Mar-2019].
- [15] Y. Zhang, L. Chu, Z. Fu, and N. Xu, “Optimal energy management strategy for parallel plug-in hybrid electric vehicle based on driving behavior analysis and real time traffic information prediction,” *Mechatronics*, vol. 46, pp. 177–192, 2017.
- [16] M. Broussely, *Battery Requirements for HEVs, PHEVs, and EVs: An Overview*. Elsevier B.V, 2010.
- [17] A. Taghavipour, M. Vajedi, N. L. Azad, and J. McPhee, *Predictive power management strategy for a PHEV based on different levels of trip information*, vol. 45, no. 30. IFAC, 2012.
- [18] H. Mettlach, “APPLICATIONS – TRANSPORTATION | Hybrid Electric Vehicle: Plug-In Hybrids,” *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 286–291, 2009.
- [19] J. Axsen, A. F. Burke, and K. S. Kurani, *Batteries for PHEVs*. Elsevier B.V, 2010.
- [20] EV Database, “Compare hybrid and electric vehicles,” *EV Database UK*, 2020. [Online]. Available: <https://ev-database.org/>. [Accessed: 07-Jan-2020].
- [21] F. Zhang, X. Hu, R. Langari, and D. Cao, “Energy management strategies of connected HEVs and PHEVs: Recent progress and outlook,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 73, pp. 235–256, 2019.
- [22] W. Cao, B. Yang, C. Chen, and X. Guan, “PHEV Charging Strategy With Asymmetric Information Based On Contract Design,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 13, pp. 520–525, Jan. 2013.
- [23] N. Adnan, S. Md Nordin, M. Hadi Amini, and N. Langove, “What make consumer sign up to PHEVs? Predicting Malaysian consumer behavior in adoption of PHEVs,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 113, no. March, pp. 259–278, 2018.
- [24] C. Silva and T. Farias, “Evaluation of Energy Consumption, Emissions, and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles,” *Electric Hybrid Vehicles*, vol. 50, no. 7, pp. 193–210, 2010.
- [25] “Cheapest electric cars - EV Database.” [Online]. Available: <https://ev-database.org/compare/cheapest-electric-vehicle>. [Accessed: 13-Jun-2019].
- [26] L. H. Björnsson and S. Karlsson, “Electrification of the two-car household: PHEV or BEV?,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 85, no. September, pp. 363–376, 2017.
- [27] “Simulador IUC 2019.” [Online]. Available: <https://impostosobreveiculos.info/iuc/simulador-iuc/>. [Accessed: 20-Jun-2019].
- [28] “Wind and solar electricity, CO2 emissions, and electricity prices for households in Western

- Europe.” [Online]. Available: <https://www.sauvonsleclimat.org/en/document-database/wind-and-solar-electricity-co2-emissions-and-electricity-prices-for-households-in-western-europe>. [Accessed: 24-Jun-2019].
- [29] K. Simonen, *Life cycle assessment*. 2014.
- [30] A. Nordelöf, M. Messagié, A. M. Tillman, M. Ljunggren Söderman, and J. Van Mierlo, “Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment?,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 19, no. 11, pp. 1866–1890, 2014.
- [31] A. Colmenar-Santos, A. M. Muñoz-Gómez, E. Rosales-Asensio, and Á. López-Rey, “Electric vehicle charging strategy to support renewable energy sources in Europe 2050 low-carbon scenario,” *Energy*, vol. 183, pp. 61–74, 2019.
- [32] G. Duarte, R. Lopes, G. Gonçalves, and T. Farias, “Energy and environmental characterization of operational modes of plug-in vehicles,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 380–390, 2013.
- [33] G. O. Duarte, R. A. Varella, G. A. Gonçalves, and T. L. Farias, “Effect of battery state of charge on fuel use and pollutant emissions of a full hybrid electric light duty vehicle,” *Journal of Power Sources*, vol. 246, pp. 377–386, 2014.
- [34] “InsideEVs | Electric Vehicle News, Reviews, and Reports.” [Online]. Available: <https://insideevs.com/>. [Accessed: 21-Nov-2019].
- [35] “Compare hybrid and electric vehicles - EV Database UK.” [Online]. Available: <https://ev-database.uk/>. [Accessed: 29-Jul-2019].
- [36] R. A. Varella, M. V. Faria, P. Mendoza-Villafuerte, P. C. Baptista, L. Sousa, and G. O. Duarte, “Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions,” *Science of Total Environment*, vol. 658, pp. 879–894, 2019.
- [37] G. O. Duarte, G. A. Gonçalves, P. C. Baptista, and T. L. Farias, “Establishing bonds between vehicle certification data and real-world vehicle fuel consumption - A Vehicle Specific Power approach,” *Energy Conversion Management*, vol. 92, pp. 251–265, 2015.
- [38] S. Singh and H. C. Frey, “Procedure for measuring and comparing fuel use and gaseous emissions for gas-direct injection versus port fuel injection vehicles,” in *Proceedings of the Air and Waste Management Association’s Annual Conference and Exhibition, AWMA*, 2017.
- [39] G. Duarte, C. Rolim, and P. Baptista, “How battery electric vehicles can contribute to sustainable urban logistics: A real-world application in Lisbon, Portugal,” *Sustainable Energy Technologies Assessments*, vol. 15, pp. 71–78, 2016.
- [40] “Comunicação aos Utilizadores de Veículos Elétricos.” MOBI.E, Portugal, pp. 1–4, 2018.
- [41] “Mobilidade Elétrica EDP - Comece a carregar o seu carro elétrico.” [Online]. Available:

- <https://www.edp.pt/particulares/servicos/mobilidade-eletrica/>. [Accessed: 17-Mar-2020].
- [42] “ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.” [Online]. Available: <https://www.erse.pt/inicio/>. [Accessed: 17-Mar-2020].
- [43] “PORDATA - Estatísticas, gráficos e indicadores de Municípios, Portugal e Europa.” [Online]. Available: <https://www.pordata.pt/>. [Accessed: 17-Mar-2020].
- [44] “Mais Gasolina - Preço dos combustíveis.” [Online]. Available: <https://www.maisgasolina.com/>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [45] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1st Edition. 1988.
- [46] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery - 6th Edition in SI Units*. 2003.
- [47] L. Gaines, E. Rask, and G. Keller, “Which is greener: idle, or stop and restart? comparing fuel use and emissions for short passenger car stops,” pp. 1–2, 2012.
- [48] ICCT, “European Vehicle,” 2019.
- [49] “MPG and Cost Calculator and Tracker - Spritmonitor.de.” [Online]. Available: <https://www.spritmonitor.de/en/>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [50] “DieselNet: Engine & Emission Technology Online.” [Online]. Available: <https://dieselnet.com/>. [Accessed: 03-Mar-2020].
- [51] INE, “Inquérito à Mobilidade nas Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa Predomínio do automóvel nas deslocações dos residentes das Áreas Metropolitanas de Porto e Lisboa,” pp. 1–22, 2018.
- [52] “Mais Gasolina - Preço dos combustíveis.” [Online]. Available: <https://www.maisgasolina.com/>. [Accessed: 20-Jun-2019].
- [53] “Select a search : Directgov - Car fuel data, CO2 and vehicle tax tools.” [Online]. Available: <https://carfueldata.vehicle-certification-agency.gov.uk/>. [Accessed: 09-Mar-2020].