INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Comparação das Emissões de Gases com Efeito de Estufa de Veículos Elétricos a Baterias e Veículos Elétricos a Pilha de Combustível Usando Análise do Ciclo de Vida

BRUNO MIGUEL ALVES TEIXEIRA

(Licenciado Em Tecnologias de Energia)

Trabalho de Projeto ou Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre

em Engenharia Eletrotécnica Ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Professor Doutor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professor Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto

Júri:

Presidente:

Professor Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata

Vogais:

Professor Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte

Professor Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto

Junho de 2023

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Comparação das Emissões de Gases com Efeito de Estufa de Veículos Elétricos a Baterias e Veículos Elétricos a Pilha de Combustível Usando Análise do Ciclo de Vida

BRUNO MIGUEL ALVES TEIXEIRA

(Licenciado Em Tecnologias de Energia)

Trabalho de Projeto ou Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre

em Engenharia Eletrotécnica Ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Professor Doutor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professor Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto

Júri:

Presidente:

Professor Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata

Vogais:

Professor Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte

Professor Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto

Junho de 2023

Agradecimentos

Em primeiro que tudo agradeço à minha mãe e à minha noiva pelo apoio que sempre me deram e pela ajuda demostrada, quero também agradecer à minha avó e a Deus. Agradeço ainda a todos os meus amigos do ISEL, aos engenheiros com quem tanto aprendi assim como a todos os meus colegas do Grupo Petrotec pelo apoio sempre demostrado.

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo a comparação das emissões de gases com efeito de estufa de veículos elétricos a baterias (BEV) e veículos elétricos a pilha de combustível (FCEV), utilizando como exemplos o *Tesla® Model 3* e o *Toyota® Mirai* respetivamente, tendo como base deste estudo o ciclo de vida de cada um dos veículos. Assim sendo, nesta dissertação realizou-se uma pesquisa teórica acerca do ciclo de vida de cada um dos veículos, tendo sido definidas fronteiras para cada ciclo.

Definidas as fronteiras, realizou-se o inventário dos veículos que permitirá estudar cada fase do ciclo de vida destes. Desta forma, ocorre a necessidade de realizar um estudo acerca dos componentes principais de cada veículo e qual o seu papel no que diz respeito às emissões de gases com efeito de estufa. Tendo determinado os ciclos de vida de cada veículo, definiu-se como base para o estudo o sistema energético português, porém, apenas se consideraram as percentagens de energia produzida através de fontes renováveis.

Recorrendo ao programa *GREET®*, foram realizadas simulações para ambos os veículos de forma a comparar as emissões de gases com efeito de estufa durante o seu ciclo de vida. Como resultados obtidos verificam-se emissões de 0,017 $kgCO_2e/km$ para os FCEV e 0,029 $kgCO_2e/km$ para os BEV, o que indica que os FCEV, no global do seu ciclo de vida, serão menos poluentes no que diz respeito à emissão de gases de efeito de estufa, comparativamente aos BEV.

Ao comparar estes valores com a meta da União Europeia onde se define que os veículos novos ligeiros de passageiros não deverão emitir a partir de 2030 mais do que 0,0594 $kgCO_2e/km$, é possível concluir que os veículos em estudo cumprem a meta estabelecida, sendo o FCEV menos poluente comparativamente ao BEV, tendo em conta o sistema energético utilizado na simulação.

Palavras-chave: **Veículos Elétricos a Bateria; Veículos Elétricos a Pilha de Combustível; Emissões de Gases com Efeito de Estufa; Ciclo de Vida; Sistema Energético Português.**

Abstract

This dissertation aims to compare greenhouse gas emissions from battery electric vehicles (BEV) and fuel cell electric vehicles (FCEV), using as an example the *Tesla*® *Model 3* and *Toyota*® *Mirai* respectively, having as the basis of this study the life cycle of each vehicle. Therefore, in this dissertation, theoretical research was carried out about the life cycle of each vehicle, having defined boundaries for each cycle.

Once the boundaries were defined, an inventory of the vehicles was carried out, which will allow the study of each phase of their life cycle. In this way, there is a need to carry out a study about the main components of each vehicle and what is their role with regard to greenhouse gas emissions. Having determined the life cycles of each vehicle, in this dissertation the Portuguese energy system was defined as the basis for the study, however, only the percentages of energy produced through renewable sources were considered.

Using the *GREET*® program, simulations were carried out for both vehicles to compare the greenhouse gas emissions during their life cycle. The results obtained show emissions of 0.017 $kgCO_2e/km$ for FCEVs and 0.029 $kgCO_2e/km$ for BEVs, which indicates that FCEVs, in their overall life cycle, will be less polluting in terms of greenhouse gas emissions compared to BEVs.

When comparing these values with the European Union target, which defines that new light passenger vehicles should not emit more than 0.0594 $kgCO_2e/km$ from 2030 onwards, it is possible to conclude that the vehicles under study meet the established target, with the less polluting FCEV compared to BEV, taking into account the energy system used in the simulation.

Keywords: Battery Electric Vehicles; Fuel Cell Electric Vehicles; Life Cycle Assessment; Greenhouse Gas Emissions; Portuguese Energy System.

Índice

Agradecimentos ..... **iii**
Resumo ..... **v**
Abstract ..... **vii**
Índice ..... **ix**
Índice de Figuras ..... **xiii**
Índice de Tabelas ..... **xv**
Lista de Siglas e Acrónimos ..... **xvii**
Capítulo 1 – Introdução **1**
1.1. Enquadramento **3**
1.1.1. Emissões de Gases de Efeito de Estufa *3*
1.1.1.1. Emissões de CO_2 devido à mobilidade 4
1.1.2. Mobilidade Elétrica *6*
1.1.2.1. Veículos Elétricos a Bateria 6
1.1.2.2. Veículos Elétricos a Pilha de Combustível 7
1.1.3. Ciclo de Vida de um Produto *8*
1.2. Objetivo da Dissertação **11**
1.3. Metodologia **12**
1.4. Estrutura de Dissertação **14**
Capítulo 2 Estado de Arte **15**
2.1. Veículos Elétricos **17**
2.1.1. Estrutura dos Veículos Elétricos a Bateria *17*
2.1.1.1. Motor Elétrico 17
2.1.1.2. Bateria 18
2.1.1.2.1. Lítio-íon (Li-íon) 18
2.1.1.2.2. Sódio-enxofre (Na-S) 20
2.1.1.2.3. Alcalinas (Ni-Cad, Ni-Fe e Ni-MH) 21
2.1.1.3. Carregador de Bordo (*On-Board Charger* - OBC) 22
2.1.1.4. Sistema de Gestão de Baterias (BMS) 23
2.1.1.5. Inversor 24
2.1.1.6. Conversor de Baixa Tensão CC-CC (LDC) 24

2.1.2. Estrutura dos Veículos Elétricos a Pilha de Combustível *24*
2.1.2.1. Pilha de Combustível 25
2.1.2.1.1. Pilha de Combustível com Membrana de Permuta de Protões (PEMFC) 25
2.1.2.1.2. Pilha de Combustível Alcalina (AFC) 26
2.1.2.1.3. Pilha de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC) 28
2.1.2.1.4. Pilha de Combustível de Metanol Direto (DMFC) 29
2.1.2.1.5. Pilha de combustível de Carbonato Fundido (MCFC) 31
2.1.2.2. Tanque de hidrogénio de Alta Pressão 33
2.1.2.3. Bateria 34
2.1.2.4. *Fuel Cell Boost Convert* 34
2.1.2.5. Motor Elétrico 35
2.1.3. Ciclo de Vida - Veículos Elétricos a Bateria *35*
2.1.3.1. Fase de Matérias-Primas 35
2.1.3.2. Fase de Produção 37
2.1.3.3. Fase de Uso 38
2.1.3.4. Fase de Fim de Vida 39
2.1.4. Ciclo de Vida - Veículos Elétricos a Pilha de Combustível *41*
2.1.4.1. Fase de Matérias-Primas 41
2.1.4.2. Fase de Produção 42
2.1.4.3. Fase de Uso 43
2.1.4.4. Fase de Fim de Vida 43
2.2. Revisão Bibliográfica 45
2.2.1. Estudo Ciclo de vida – Veículo Elétrico a Bateria, BEV *45*
2.2.2. Estudo Ciclo de vida – Veículo Elétrico a Pilha de Combustível, FCEV *51*
Capítulo 3 – Metodologia 57
3.1. Veículos Elétricos a Bateria 59
3.1.1. Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida *59*
3.1.2. Extração e Produção dos Componentes do Veículo *61*
3.1.3. Fase de Uso *61*
3.1.4. Fase de Fim de Vida *62*
3.2. Veículos Elétricos a Pilha de Combustível 63
3.2.1. Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida *63*
3.2.2. Extração e Produção dos Componentes do Veículo *65*
3.2.3. Fase de Uso *65*

3.2.4. Fase de Fim de Vida *66*
3.3. GREET.NET ® **67**
Capítulo 4 – Análise e Discussão de Resultados **71**
4.1. Dados Utilizados para a Simulação **73**
4.2. Características dos Veículos **75**
4.2.1. Tesla® Model 3 ..... *75*
4.2.2. Toyota® Mirai *76*
4.3. Análise dos Resultados **77**
4.3.1. Emissões de Gases de Efeito de Estufa – Tesla® Model 3 ..... *77*
4.3.2. Emissões de Gases de Efeito de Estufa – Toyota® Mirai *80*
4.4. Discussão dos Resultados **83**
Capítulo 5 – Conclusão e Trabalhos Futuros **89**
Bibliografia **93**

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Evolução da emissão de CO_2 por novos veículos..... 6
Figura 1.2 – *Veículos Elétricos a Bateria* 7
Figura 1.3 – Veículos Elétricos a Pilha de Combustível..... 8
Figura 1.5. – *Well-to-Wheel*, WTW..... 10
Figura 2.1. – Motor Síncrono..... 18
Figura 2.2 – Bateria de Lítio-íon..... 19
Figura 2.3 – Bateria de sódio-enxofre 20
Figura 2.4 – Bateria Alcalina 21
Figura 2.6 – *On-Board Charger*..... 22
Figura 2.7 – Sistema de Gestão de Baterias, BMS..... 23
Figura 2.8 – Inversor CC/CA..... 24
Figura 2.9 – Pilha de Combustível com Membrana de Permuta de Protões..... 26
Figura 2.10 – Pilha de Combustível Alcalina (AFC) 27
Figura 2.11 – Pilha de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)..... 28
Figura 2.12 – Pilha de Combustível de Metanol Direto (DMFC) 29
Figura 2.13 – Pilha de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)..... 31
Figura 2.14 – Pilha de combustível de Carbonato Fundido (MCFC)..... 32
Figura 2.15 – Tanque de hidrogénio de Alta Pressão..... 34
Figura 2.16 – *Fuel Cell Boost Convert* 35
Figura 2.17 – Materiais usados na produção do BEV 36
Figura 2.18 – Produção Mundial de Veículos Elétricos entre 2010-2017..... 38
Figura 2.19 – Ciclo de Vida WTT e TTW 39
Figura 2.20 – Ciclo de Vida da bateria..... 41
Figura 2.21 – Fase de Uso dos FCEV, RE – *Renewable Electrolysis*, NG – Natural Gás..... 43
Figura 2.22 – Método Hidrometalúrgico..... 44
Figura 3.1 – Programa GREET ®..... 67
Figura 4.1 – Energia Produzida em Portugal 73
Figura 4.2 – Ciclo de Vida – *Tesla® Model 3*..... 78
Figura 4.4 – Ciclo de Vida – *Toyota® Mirai*..... 80
Figura 4.5 – Fase de Produção do Toyota® Mirai 82

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Evolução das emissões de CO_2 e metas estabelecidas 5
Tabela 2.1– Análise dos Artigos Científicos - BEV..... 46
Tabela 2.2 – Resultados do LCA do *Tesla® Model 3* 46
Tabela 2.3 – Resultados das emissões de GEE dos LCA dos BEV entre [2030 e 2050] 48
Tabela 2.4 – Variação das Emissões de GEE entre [2020 a 2030] 51
Tabela 2.5 – Variação das Emissões de GEE entre [2030 a 2040] 51
Tabela 2.4 – Resultados obtidos para o Sul e Norte da Califórnia..... 52
Tabela 2.5 – Resultados obtidos – Ciclo de vida do FCEV. 53
Tabela 2.6 – Vias de Produção de Hidrogénio..... 54
Tabela 2.7 – Vias de Produção de Hidrogénio..... 55
Tabela 3.1 – Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida do BEV. 60
Tabela 3.2 – Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida do FCEV..... 64
Tabela 4.1 – Caraterísticas gerais do *Tesla® Model 3* 75
Tabela 4.2 – Caraterísticas gerais do *Toyota® Mirai* 76
Tabela 4.3 – Emissões de GEE do Ciclo de Vida do *Tesla® Model 3* 77
Tabela 4.4 – Emissões de GEE na Fase de Produção do *Tesla® Model 3*..... 78
Tabela 4.5 - Emissões de GEE do Ciclo de Vida do *Toyota®* Mirai..... 80
Tabela 4.6 – Emissões de GEE na Fase de Produção do *Toyota® Mirai*..... 81
Tabela 4.6 - Emissões de GEE do Ciclo de Vida: *Toyota® Mirai Vs Tesla® Model 3* 83
Tabela 4.7 – Emissões de GEE na Fase de Produção: *Toyota® Mirai Vs Tesla® Model 3*..... 84
Tabela 4.8 – Dados recolhidos nos artigos analisados 86

Lista de Siglas e Acrónimos

A	*Ampere*
AFC	*Alkaline fuel cell*
APREN	*Associação Portuguesa de Energias Renováveis*
APU	*Auxiliary Power Unit*
BEV	*Battery Electric Vehicles*
BMS	*Battery Management System*
CA	*Corrente Alternada*
CC	*Corrente Continua*
CO	*Monóxido de Carbono*
CO_2	*Dióxido de Carbono*
CTG	*Cradle-to-Grave*
DMFC	*Direct Methanol Fuel Cell*
EV	*Electric Vehicles*
FCEV	*Fuel Cell Electric Vehicles*
GEE	*Gases com Efeito de Estufa*
GREET	*Greenhouse, Regulated Emissions and Energy use in Transportation*
GWP	*Global Warming Potential*
H2	*Hidrogénio*
HC	*Hidrocarbonetos*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO	*International Organization for Standardization*
LCA	*Life Cycle Assessment*
MCFC	*Molten Carbonate Fuel Cell*
NCA	*Níquel-Carboxianidretos*
NCM	*Níquel-Cobalto-Manganês*
NOx	*Óxidos de Azoto*
OBC	*On-Board Charger*
PAFC	*Phosphoric Acid Fuel Cell*
PEMFC	*Proton-Exchange Membrane Fuel Cell*
PHEV	*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*
PM	*Particulate Matter*
PTW	*Pump-to-Wheel*
SERA	*Scenario Evaluation and Regionalization Analysis*
SOFC	*Solid Oxide Fuel Cell*
V	*Volt*
WTT	*Well-to-Tank*
WTW	*Well-to-Wheel*

Capítulo 1 – Introdução

O capítulo 1 fará referência a tópicos como o enquadramento teórico, destacando as emissões de gases com efeito de estufa, os veículos elétricos a baterias e os veículos elétricos a pilha de combustível, assim como os seus ciclos de vida. Também neste capítulo, poderá observar-se a estrutura da dissertação e os objetivos da mesma.

1.1. Enquadramento

1.1.1. Emissões de Gases de Efeito de Estufa

Uma das principais adversidades do século XXI trata-se das alterações climáticas. Estas alterações em grande parte devem-se à emissão de gases com efeito de estufa (GEE). Estes gases em geral são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) os hidrocarbonetos (HC), os óxidos azoto (NO_x), o hexafluoreto de Enxofre (SF6) e o Metano (CH4).

As emissões destes gases geralmente podem ser expressas em unidade de massa de CO_2 ou unidade de massa de CO_{2e}. Quando estas são expressas em unidade de massa de CO_{2e}, refere-se a uma medida internacional que estabelece a equivalência entre todos os GEE e o dióxido de carbono, de modo a facilitar a análise dos impactos destas emissões para o aquecimento global.

O dióxido de carbono (CO_2) é um gás que é produzido na fase de combustão de substâncias que tenham na sua composição carbono formando-se com o consumo de oxigénio gasoso. Este gás, não sendo tóxico para o ser humano, é um dos grandes responsáveis pelo aquecimento global.

Ao contrário do CO_2, o CO é um gás tóxico para o ser humano. Este é produzido quando existe combustão incompleta de compostos com átomos de carbono na sua composição, tal como acontece com o diesel/gasóleo e gasolina. Este gás também tem como característica ser incolor assim como inodoro.

Os hidrocarbonetos são compostos por hidrogénio e carbono, estes gases são obtidos pela combustão incompleta dos carbonetos ou pela evaporação dos mesmos, os quais podem ser libertados, por exemplo quando os veículos são abastecidos nos postos de combustíveis.

No sector automóvel e nas centrais elétricas a combustão de combustíveis fósseis provoca a emissão de dióxido de enxofre e de óxidos de azoto, incluindo não só os monóxidos de azoto, mas também, os dióxidos de azoto, formados a altas temperaturas nos motores a combustível que contenham azoto. Por sua vez, esta queima de combustíveis, com a libertação dos gases acima referidos, provoca chuvas ácidas.

As partículas PM, *Particulate Matter*, são produzidas pelo tráfego rodoviário, estando geralmente associadas aos veículos de combustão a gasóleo. Habitualmente as frações das partículas apresentam diâmetros entre os 10 a 2.5 micrómetros, PM_{10} e $PM_{2.5}$. Dentro destes dois tipos as partículas de $PM_{2.5}$, uma vez que apresentam diâmetros inferiores a 0.1 micrómetros, revelam capacidades de penetrar os pulmões bem como outros órgãos do corpo humano [1].

De forma a minimizar os efeitos dos gases, com o Acordo de Paris estabelecido em 2015, foram estabelecidos os seguintes objetivos [2]:

1 – Limitação do aumento médio da temperatura global a 1,5 ºC;
2 – Reconhecimento dos benefícios da redução de forma significativa em termos das alterações climáticas por parte dos líderes europeus;
3 – Aumento da capacidade de adaptação aos impactos das alterações climáticas.

Segundo o Relatório Especial do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), de modo a ser possível obter-se a neutralidade carbónica em 2050, é necessário que a emissão de GEE tal como CO_2 diminuam cerca de 45% até 2030 face aos níveis atingidos em 2010.

1.1.1.1. Emissões de CO_2 devido à mobilidade

Tendo em conta as metas estabelecidas, e uma vez que na Europa cerca de 40% das emissões de GEE estão relacionados com o setor do transporte, ao longo destas duas décadas desde 2000 até 2020 foram estabelecidas metas para a emissão de CO_2 por quilómetro de novos veículos.

Em 2019 as emissões médias de CO_2 de todos os carros novos apresentavam cerca

de 122,30 g CO_2/km, abaixo das emissões médias de CO_2 previstas para o mesmo ano de 130 g CO_2/km. Em 2020 foi implementada a meta de emissões por veículos ligeiros de passageiros de 95 g CO_2/km, tendo sido cumprida.

Na tabela 1.1 pode-se observar a evolução das emissões médias de CO_2 de automóveis novos de passageiros, assim como as metas estabelecidas para a limitação das mesmas [2].

Tabela 1.1 – Evolução das emissões de CO_2 e metas estabelecidas [2].

Ano	Emissões médias de CO2 de automóveis novos de passageiros	Meta para carros novos de passeio (gCO2/km)	Emissões médias de CO2 de automóveis novos de passageiros a gasolina	Emissões médias de CO2 de automóveis novos de passageiros a diesel
2000	172,1			177,4
2001	169,7			175,3
2002	167,2			173,5
2003	165,5			171,7
2004	163,4			170
2005	162,4			168,1
2006	161,3			164,9
2007	158,7			161,6
2008	153,5			156,6
2009	145,7			147,6
2010	140,3			142,5
2011	135,7			137,6
2012	132,2			133,7
2013	126,7			128,5
2014	123,4			125,6
2015	119,5	130		122,5
2016	118,1			121,7
2017	118,5			121,6
2018	120,8			123,4
2019	122,3			
2020		95	95	
2021				
2022				
2023				
2024				
2025		80,8		
2026				
2027				
2028				
2029				
2030		59,4		

Conforme se pode observar as emissões de CO_2 por quilómetro tendem a diminuir, tendo sido estabelecida a meta de cerca de 59,40 g CO_2/km de emissões dos novos veículos, para 2030.

Muito do sucesso da diminuição de GEE deve-se à adição de veículos alternativos

aos veículos de combustão interna como os veículos elétricos a baterias (*Battery Eletric Vehicles* – BEV) ou os veículos elétricos a pilha de combustível (*Fuel Cell Eletric Vehicles* – FCEV), desta forma estes veículos terão impacto no que diz respeito a atingir as metas estabelecidas conforme se pode observar na figura 1.1 [2].

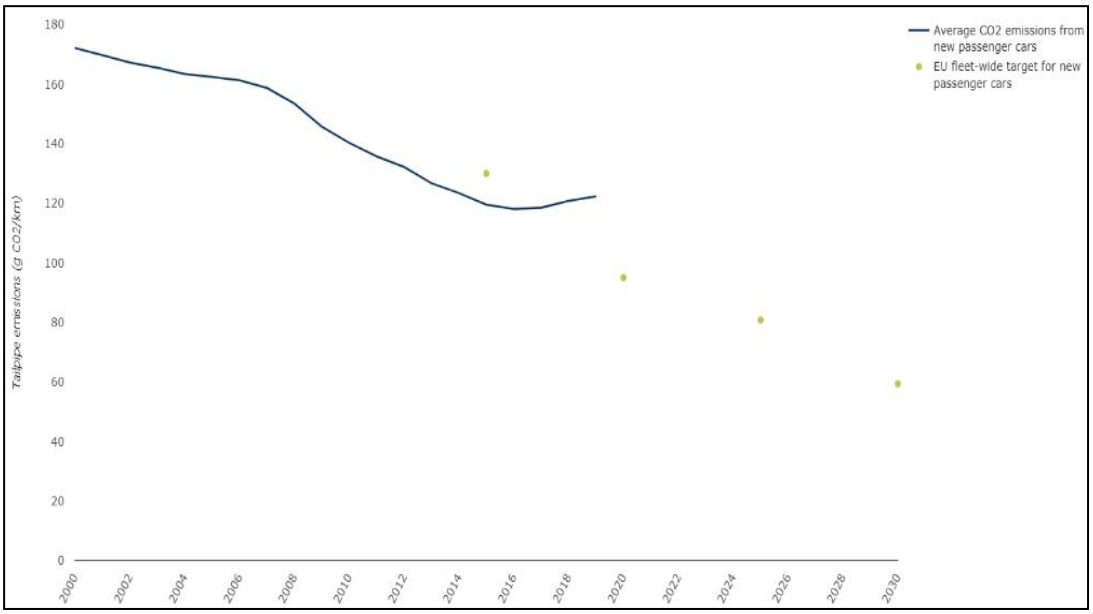


Figura 1.1 – Evolução da emissão de CO_2 por novos veículos

1.1.2. Mobilidade Elétrica

Os Veículos Elétrico (EV) englobam veículos como os veículos híbridos *Plug-in*, (PHEV), os veículos elétricos a bateria (BEV) e os veículos elétricos a pilha de combustível (FCEV).

1.1.2.1. Veículos Elétricos a Bateria

Geralmente um veículo com motor de combustão é constituído por cerca de 1000 peças, ao contrário do BEV que é constituído por cerca de 200 peças. Na figura1.2 pode se observar os principais componentes destes veículos [3]:

- Motor Elétrico;
- Bateria;
- Sistema de Gestão de Baterias (BMS);
- Carregador de Bordo (*On-Board Charger*);

- Inversor;
- Conversor de Baixa Tensão DC-DC (LDC);
- Unidade de Controlo do Veículo.

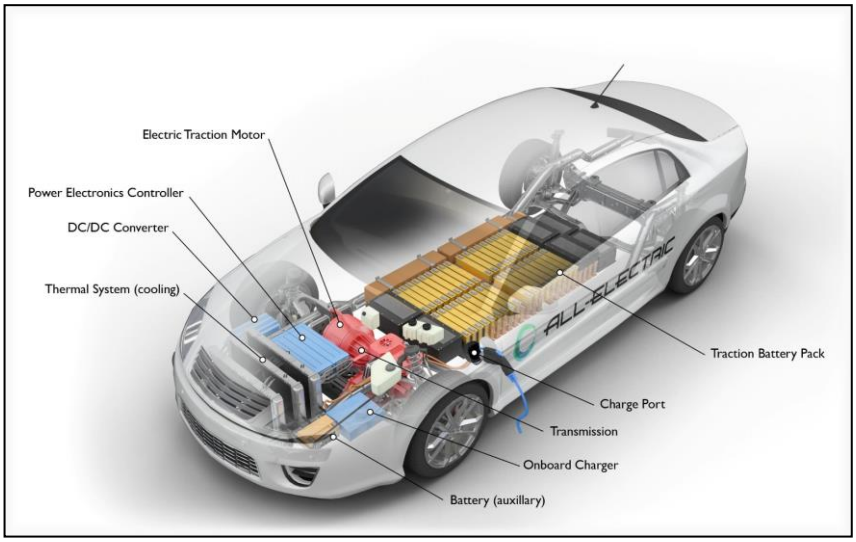


Figura 1.2 – *Veículos Elétricos a Bateria*

1.1.2.2. Veículos Elétricos a Pilha de Combustível

Uma das outras alternativas aos veículos de combustão interna é, sem dúvida, o FCEV. Este veículo, tal como o BEV, encontra-se na categoria de veículo elétrico, apresentando um número inferior de peças comparativamente aos veículos com combustão interna. Tal como se pode observar na figura 1.3, os componentes principais destes veículos são [4]:

- Conversor de "Reforço" da Célula de Combustível (*Fuel Cell Boost Converter*);
- "Stack" da Célula de Combustível (*Fuel Cell Stack*);
- Bateria Elétrica;
- Tanque de Alta Pressão (*High-Pressure Hydrogen Tank*);
- Motor Elétrico;
- Unidade de Controlo de Potência (*Power Control Unit*).

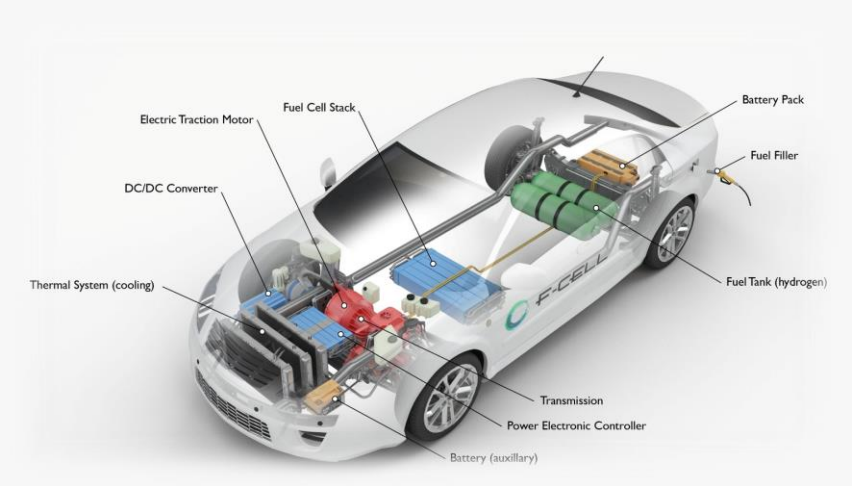


Figura 1.3 – Veículos Elétricos a Pilha de Combustível

Conforme já referido nesta dissertação, estes veículos serão um grande contributo para atingir os objetivos para a neutralidade carbónica de 2050 no que diz respeito às emissões de GEE, uma vez que na fase de uso destes veículos não emitem tais gases. Porém emitem ao longo do ciclo de vida, sendo necessário, desta forma, analisar tais emissões através do estudo do ciclo de vida destes.

1.1.3. Ciclo de Vida de um Produto

Para analisar um Ciclo de Vida de um produto (*Life Cycle Assessment*, LCA) pode-se recorrer às normas ISO 14040 e ISO 14044. Com estas ISO é possível verificar os fluxos de materiais e de energia desde a fase de produção até ao fim de vida de um produto, exemplo disso é a figura 1.4. [5].

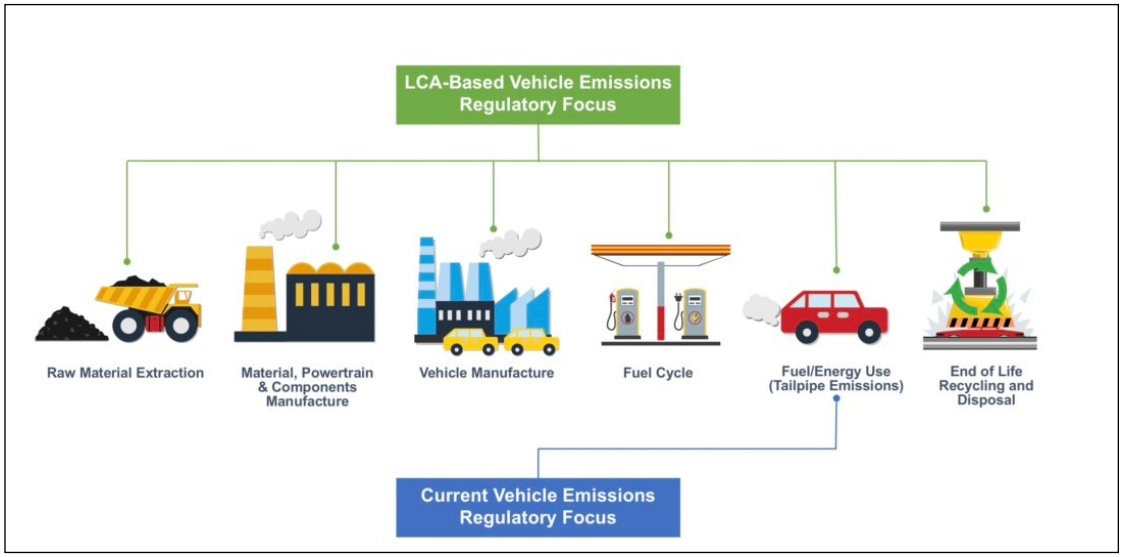


Figura 1.4. – *Life Cycle Assessment*, LCA [5]

Geralmente para se realizar uma análise com recurso a estas normas devemos ter em contas quatro etapas importantes, sendo elas:

1. Definição do objetivo e fronteiras do sistema; (Etapa 1)
2. Realização do inventário de ciclo de vida; (Etapa 2)
3. Avaliação dos impactes; (Etapa 3)
4. Interpretação/Analise das avaliações dos impactes ambientais. (Etapa 4)

Relativamente à definição do objetivo (etapa 1) deve realizar-se uma análise ao ciclo completo do produto. No âmbito desta dissertação vai-se analisar o ciclo de vida dos veículos elétricos a baterias e a pilha de combustível. Assim, deve ser realizada uma análise desde a extração dos minérios para a produção dos componentes dos próprios veículos, passando pela fase de utilização e terminando com a fase de fim de vida dos mesmos. Este tipo de análise também se pode designar como "*cradle-to-grave*", (CTG).

Face à importância do estudo do ciclo de vida destes veículos, foi desenvolvida, especialmente para análise do ciclo de vida de veículos (sejam eles de combustão interna ou sejam eles elétricos), a metodologia designada por "*Well-to-Wheel*", (WTW), i. e., "da extração à roda". Esta metodologia avalia os impactes ambientais, não só em termos de consumo de energia, mas também em relação a emissões, uma vez que avalia desde a produção dos combustíveis até à utilização do veículo [6].

A WTW também pode ser divida em subcamadas como, *Well-to-Tank* (WTT) ou *Pump-to-Wheel* (PTW). Este método é mais utilizado quando se trata de fontes primárias de origem fóssil, como é o caso do petróleo. Tanto o WTT como o PTW se referem ao ciclo de utilização, em que a energia de entrada/armazenada é utilizada para combustível do veículo tal como se pode observar na figura 1.5. [6]

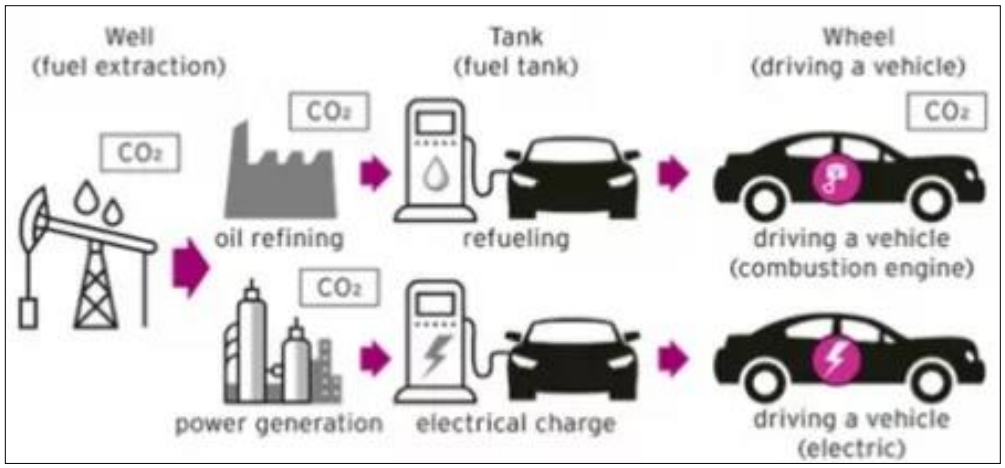


Figura 1.5. – *Well-to-Wheel*, WTW [6]

1.2. Objetivo da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo a comparação das emissões de GEE dos veículos a bateria e veículos elétricos a pilha de combustível através da análise do ciclo de vida dos mesmos.

Tendo em conta os dias em que vivemos e a transição energética atual, nesta dissertação será considerado que ambos os veículos são abastecidos apenas por energias renováveis, ou seja, considera-se que o carregamento dos veículos a bateria será realizado utilizando apenas energias de origem renovável. Da mesma forma, para os veículos a pilha de combustível será considerado que a produção de hidrogénio apenas recorre a energias renováveis, tendo em conta o sistema energético em Portugal.

Por último, através da metodologia "*Well-to-Tank*" irá comparar-se as emissões dos ciclos de vida de cada um dos veículos.

1.3. Metodologia

Para este estudo, foram tidos em conta os ciclos de vida de cada veículo, considerando a ISO 14040, onde são definidas as fronteiras do ciclo assim como o inventário realizado para cada fase deste.

Desta forma definiram-se para cada veículo as seguintes fases:

1. Fase de Produção;
2. Fase de Uso;
3. Fase de Fim de Vida.

Com as fases do ciclo de vida definidas, foi realizado um inventário para cada fase do ciclo de vida destes veículos. Na fase de produção o inventário apresenta os componentes que constituem os veículos, bem como a extração de matérias-primas como o lítio para a produção das baterias destes veículos. Na fase de uso o inventário tem em conta a manutenção dos veículos, os abastecimentos e os carregamentos elétricos realizados pelo do veículo *Toyota® Mirai*, como exemplo dos veículos a pilha de combustível, e pelo *Tesla ® Model 3*, como exemplo dos veículos puramente elétricos. A fase de fim de vida apresenta um inventário baseado na necessidade de se verificar quais os materiais/componentes que poderão ser reutilizados ou se, por outro lado, não terão de ser descartados.

Tendo em conta estes elementos, para a realização dos ciclos de vida dos veículos foi utilizado para o presente estudo o programa *GREET ®* [7], versão GREET.NET 2021, considerando-se as características do veículo *Tesla ® Model 3* e as características do veículo *Toyota® Mirai*. Na escolha destes dois veículos foi tido em conta que ambos tivessem a mesma categoria, neste caso, classe B, sendo, tanto o *Model 3* como o *Mirai*, considerados veículos ligeiros de passageiros.

Este programa permite a análise dos ciclos de vida do combustível e a sua utilização, bem como a análise do ciclo de vida do veículo que se pretende analisar. O *GREET*® irá permitir obter dados acerca dos seguintes elementos:

1. Consumo de energia total e fontes de produção de energia;
2. Emissões dos GEE.

1.4. Estrutura de Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo descreve o enquadramento com explicações teóricas acerca de temas como as emissões de GEE devido à mobilidade, o fabrico de veículos elétrico e o seu ciclo de vida para o veículo elétrico a bateria, assim como para o veículo elétrico a pilha de combustível. Por fim neste capítulo podem-se observar os objetivos desta dissertação bem como a estrutura da mesma.

No segundo capítulo é apresentado o estado de arte, descrevendo-se, com maior pormenor, os componentes principais tanto do BEV como do FCEV, como são produzidos e a sua composição. São, igualmente, descritos mais pormenorizadamente os ciclos de vida de cada veículo, desde a exploração de minérios até ao seu fim de vida. Neste capítulo pode-se, também, encontrar uma análise de artigos científicos.

No terceiro capítulo, observa-se a metodologia empregue no estudo da presente dissertação tanto como o programa utilizado para simulação e os dados de comparação entre os dois veículos que serão usados para a realização destas simulações.

No quarto capítulo, irão ser demonstrados os resultados obtidos através do programa *GREET*® e consequentemente a análise aos mesmos, sendo destacados os resultados dos GEE de cada veículo e a comparação entre os mesmos.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas nesta dissertação, apresentando os valores alcançados, tendo em conta as simulações acerca das emissões de GEE do ciclo de vida de cada veículo, concluindo qual o mais e menos poluente assim como sugestões de possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2 Estado de Arte

Este capítulo fará referência aos componentes principais dos veículos elétricos tanto a bateria como a pilha de combustível, explicando o seu funcionamento e a sua produção. Também poderá observar-se as análises realizadas a artigos científicos relativos aos objetivos desta dissertação.

2.1. Veículos Elétricos

2.1.1. Estrutura dos Veículos Elétricos a Bateria

Como já referido nesta dissertação, os veículos elétricos a baterias possuem na sua composição os principais elementos:

- Motor Elétrico;
- Bateria;
- Carregador de Bordo (*On-Board Charger*);
- Sistema de Gestão de Baterias (BMS);
- Inversor;
- Conversor de Baixa Tensão DC-DC (LDC);
- Unidade de Controlo do Veículo.

2.1.1.1. Motor Elétrico

Estes motores utilizam a energia das baterias para a tração das rodas dos veículos, convertendo a energia armazenada nas baterias destes em energia cinética, de forma a haver tração das rodas dos veículos [8].

Comparativamente a um motor de combustão interna, o motor de acionamento elétrico atinge o binário máximo na primeira rotação, sem que seja necessária uma fase de inicialização para atingir a marcha lenta.

Porém, quando é atingido um determinado valor de rotações por minuto (rpm) específico, o binário deste motor tende a diminuir à medida que as rotações aumentam.

Os motores utilizados, em geral, nestes veículos são os síncronos trifásicos, alimentados por corrente alternada (CA) trifásica. Estes motores são constituídos por três bobines que são colocadas ao redor do rotor formando, desta forma, o estator. De seguida, os pares de ímanes permanentes são colocados no rotor deste motor. Uma vez

alimentadas, as bobines criam um campo elétrico rotativo fazendo girar o rotor quando o motor elétrico é utilizado para acionar o veículo. Na figura 2.1. pode-se observar um motor síncrono genérico para estes veículos [8].

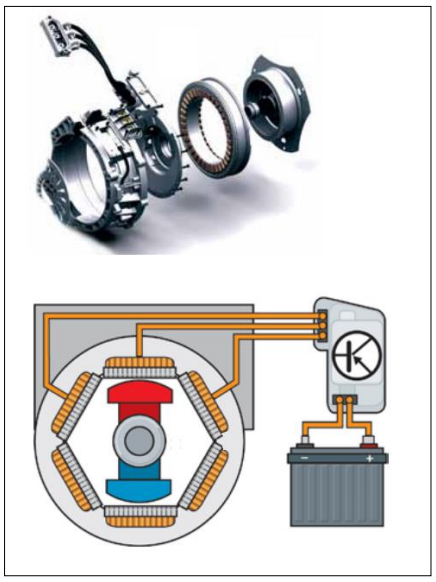


Figura 2.1. – Motor Síncrono [8]

2.1.1.2. Bateria

A bateria armazena eletricidade para uso do motor elétrico de tração. Muitos dos fabricantes de baterias para veículos elétricos consideram que as baterias atingem o seu fim de vida entre os 8 a 10 anos de uso, habitualmente quando a capacidade nominal da bateria cai para 80% [9]. Porém, as baterias ainda conseguem fornecer energia útil, mesmo com a sua capacidade inferior a 80%.

Atualmente, a tecnologia mais utilizada de bateria para estes veículos é a bateria de iões de Lítio (Li-íon), porém existem vários tipos de tecnologias, tais como Sódio-enxofre (Na-S) e Alcalinas (Ni-Cad, Ni-Fe e Ni-MH) [9].

2.1.1.2.1. Lítio-íon (Li-íon)

Esta bateria apresenta densidades de energia até 140 Wh/kg, contudo, em alguns casos, algumas destas baterias podem chegar a 280 Wh/kg [9].

Esta bateria é constituída por um cátodo e um ânodo, em que as semirreações são as seguintes:

Cátodo, ião positivo:

$$Li_{1-x}CoO_2 + xe^- \leftrightarrow LiCoO_2$$

Ânodo, ião negativo:

$$xLiC_6 \leftrightarrow xLi^+ + xe^- + xC_6$$

Um dos grandes problemas desta tecnologia de baterias está associado a ambientes frios que dificultam o movimento dos iões de lítio tornando estes mais lentos e aumentando assim o tempo de carregamento [9].

Atualmente, a maioria dos cátodos são constituídos por níquel-cobalto-manganês, (NCM) ou níquel-carboxianidretos (NCA). Por outro lado, os ânodos geralmente são constituídos por grafite, carbono macio ou duro ou carbono de silício como se pode observar na figura 2.2 [9].

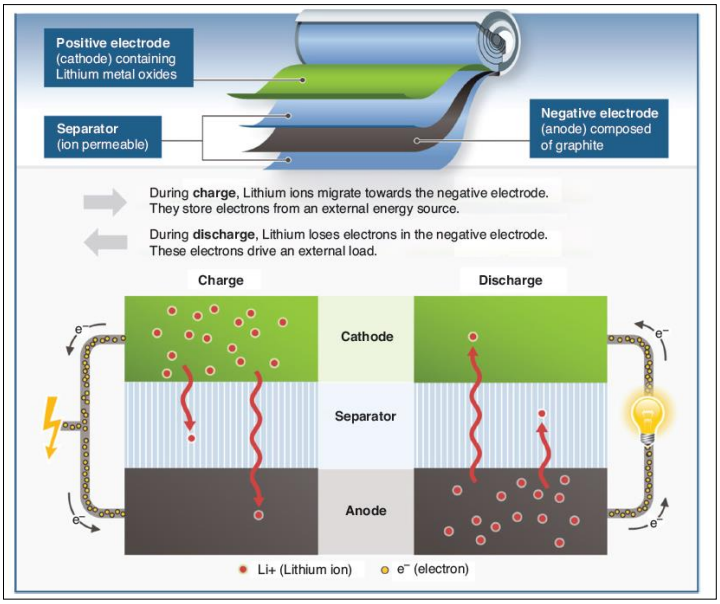


Figura 2.2 – Bateria de Lítio-íon [9]

Estas baterias podem atingir tensões nominais de cerca de 4.2 V devido aos eletrólitos de alta tensão.

2.1.1.2.2. Sódio-enxofre (Na-S)

As baterias de sódio-enxofre ou Na-S são constituídas por um cátodo de sódio líquido onde é colocado um coletor de corrente sendo este um elétrodo sólido de alumina, ou seja um óxido de alumínio tal como se pode observar na figura 2.3 [9].

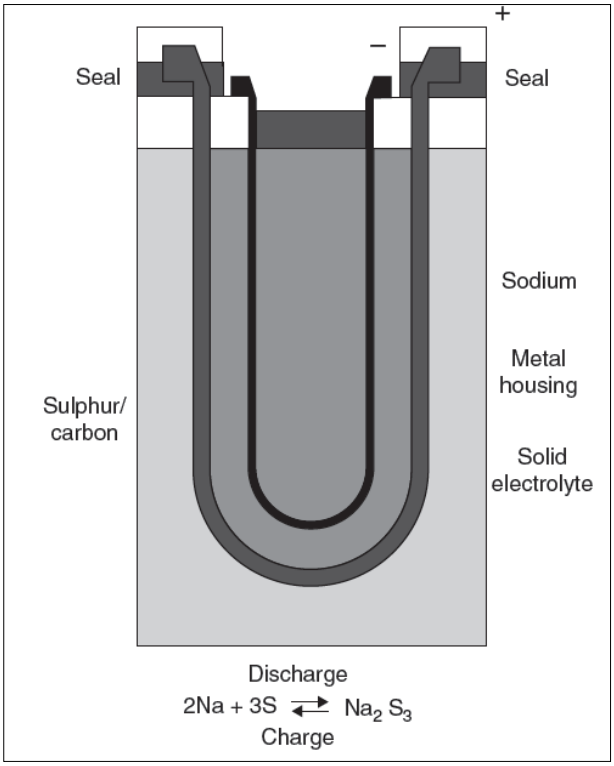


Figura 2.3 – Bateria de sódio-enxofre [9]

Um dos principais problemas desta tecnologia é a temperatura de funcionamento que necessita de atingir temperaturas entre os 300 e os 350 ºC. Assim, é colocado no circuito um aquecedor, de modo que essas temperaturas sejam atingidas [9].

A temperatura da bateria é mantida quando em uso, devido à corrente que flui através da resistência da bateria [9].

Cada célula desta bateria tem dimensões muito reduzidas, contendo apenas cerca de 15 g de sódio. Estas dimensões estão relacionadas com a segurança das mesmas, uma vez que se uma célula for danificada o enxofre do lado de fora faz com que o sódio seja convertido em polissulfeto tornando-se inofensivo. Esta célula tem capacidade de cerca

de 10 Ah e tensões de saída de cerca 2 V [9].

2.1.1.2.3. Alcalinas (Ni-Cad, Ni-Fe e Ni-MH)

Estas baterias utilizadas em veículos são constituídas por células de níquel-cádmio (Ni-Cad ou NiCad) e são constituídas por [9]:

1. Ânodo – Hidrato de níquel (NiOOH);
2. Cátodo – Cádmio (Cd)
3. Eletrólito – Hidróxido de potássio (KOH) e água (H_2O).

O processo de carregamento destas baterias consiste no movimento do oxigénio da placa negativa para a placa positiva. O processo de descarga é o inverso do processo de carga [9].

Quando a bateria está totalmente carregada, a placa negativa torna-se cádmio puro e a placa positiva torna-se hidrato de níquel [9].

Estes processos químicos podem ser descritos pela seguinte equação:

$$2NiOOH + Cd + 2H_2O + KOH \Rightarrow 2Ni(OH)_2 + CdO_2 + KOH$$

As baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-MH ou NiMH) são utilizadas em alguns veículos elétricos como nos veículos da Toyota. Nas figuras 2.4 e 2.5 pode-se observar as baterias acima descritas [9].

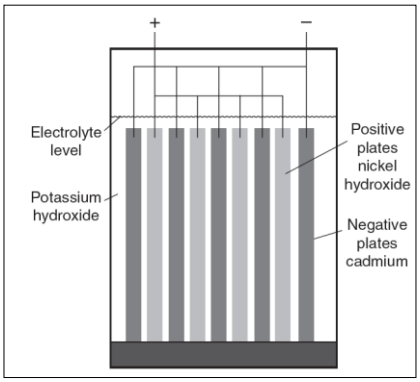


Figura 2.4 – Bateria Alcalina [9]

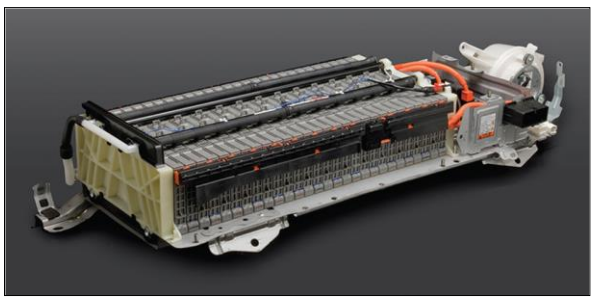


Figura 2.5 – Bateria de Hidrato de Níquel [9]

Estas baterias apresentam o dobro da densidade energética das baterias de chumbo-ácido, porém menor que as baterias de iões de lítio [9].

2.1.1.3. Carregador de Bordo (*On-Board Charger* - OBC)

O OBC permite carregamentos em corrente alternada. Para além disso, os OBC bidirecionais podem ser utilizados de formas diferentes, sendo algumas delas [10]:

1. Fornecer energia do veículo para a casa *(Vehicles-to-home, V2H);*
2. Fornecer energia do veículo para a carga *(Vehicles-to-Load, V2L);*
3. Fornecer energia entre veículos, em caso de emergência *(Vehicles-to-Vehicles, V2V).*

Os OBC podem ser classificados como OBC monofásicos de 0 a 7 kW e OBC trifásicos de 7 kW a 43,5 kW, como se pode observar na figura 2.6 [10].

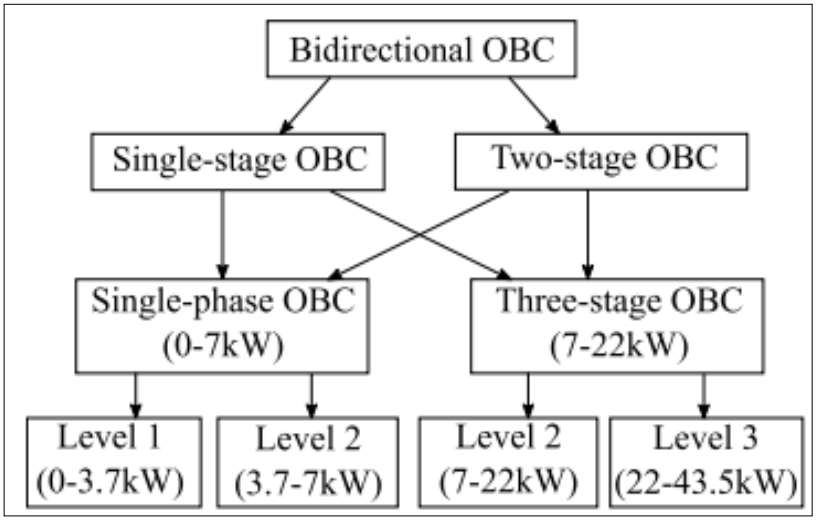


Figura 2.6 – *On-Board Charger* [10]

O tempo de carregamento é inversamente proporcional ao nível de potência, devido aos requisitos para tempos de carregamento mais curtos [10].

2.1.1.4. Sistema de Gestão de Baterias (BMS)

Uma das principais funções do BMS, *Battery Management System*, é estimar o estado da bateria para prever a quantidade real de energia que é necessária fornecer à bateria, uma vez que o desempenho da bateria em termos de capacidade útil e resistência interna varia ao longo do tempo, como se poderá observar na figura 2.7 [6].

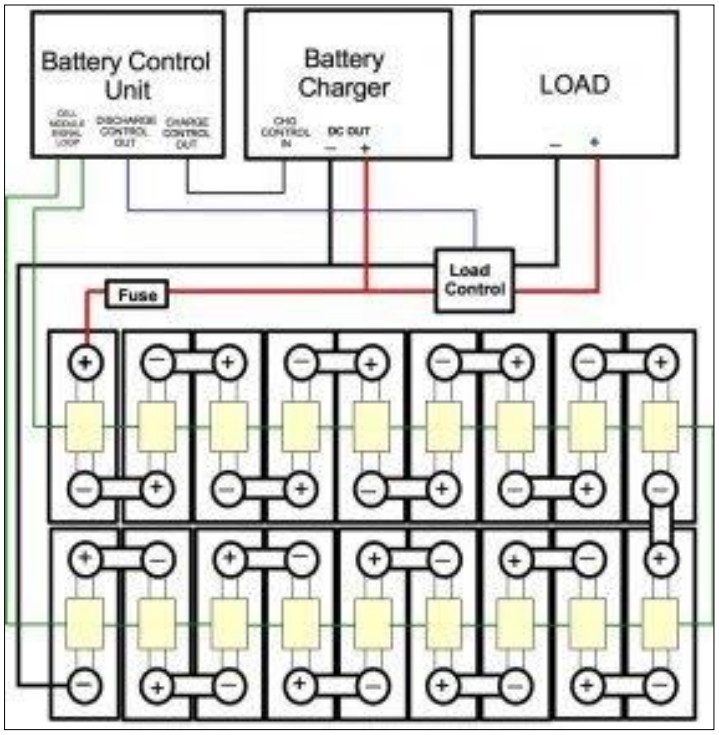


Figura 2.7 – Sistema de Gestão de Baterias, BMS [6]

Outra função do BMS é gerir o balanceamento das células da bateria de modo a maximizar a energia armazenada, bem como proteger as células nos ciclos de carga/descarga e assim prolongar a vida útil da bateria. Isto devido ao facto de existir uma diminuição da capacidade útil da bateria, consequência da utilização do veículo e dos ciclos de carregamentos efetuados [6].

2.1.1.5. Inversor

O inversor permite a transformação da corrente continua, CC, da bateria de tração em corrente alterna, CA, para alimentar o motor, e reverte novamente este processo CA para CC quando existe a regeneração da travagem. Conforme se pode observar na figura 2.8 o inversor é responsável pela conversão da CA para a CC [11].

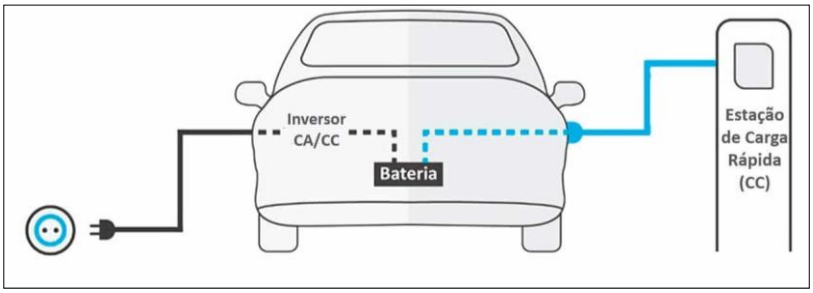


Figura 2.8 – Inversor CC/CA [11]

2.1.1.6. Conversor de Baixa Tensão CC-CC (LDC)

Atualmente, nos BEV, o conversor CC-CC é utilizado para conversão de até 12 V tensão típica de carro, embora existam voltagens mais altas, como 42 V para a direção hidráulica [12].

Geralmente à entrada destes conversores observam-se valores de 250-450 V, e à saída verificam-se tensões de 12,5 a 15,5 V, podendo apresentar potências de saída que se encontram entre os 250 W e os 3,5 kW. As eficiências destes conversores variam entre os 80-90% [12].

2.1.2. Estrutura dos Veículos Elétricos a Pilha de Combustível

O veículo a pilhas de combustível, em termos de componentes, tem muitas semelhanças com os veículos elétricos a bateria com algumas diferenças como a pilha de combustível ou em inglês, *Fuel Cell*.

2.1.2.1. Pilha de Combustível

Atualmente existem seis principais tipos de pilhas de combustível:

1. Pilha de Combustível com Membrana de Permuta de Protões (PEMFC);
2. Pilha de Combustível Alcalina (AFC);
3. Pilha de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC);
4. Pilha de Combustível de Metanol Direto (DMFC);
5. Pilha de Combustível de Óxido Sólido (SOFC);
6. Pilha de combustível de Carbonato Fundido (MCFC).

No caso dos veículos elétricos a pilhas de combustível, estes utilizam a Pilha de combustível com membrana de permuta de protões, PEMFC.

2.1.2.1.1. Pilha de Combustível com Membrana de Permuta de Protões (PEMFC)

Das tecnologias conhecidas das pilhas de combustível, a PEMFC é a tecnologia mais utilizada para os veículos elétricos, FCEV, apresentando eficiências que variam entre os 35-60%, conseguindo variar a tensão de saída muito rapidamente [13].

Em termos de potências de saída estas conseguem atingir potências que variam entre os 50 kW a 250 kW, conseguindo trabalhar em temperaturas que variam próximo dos 80ºC [13].

Esta membrana é uma folha plástica fina que facilita a passagem dos iões, H^+, sendo revestida em ambos os lados por partículas de um metal altamente dispersivo tal como a platina, constituindo assim o catalisador ativo, por outro lado, o eletrólito é um polímero sólido orgânico de ácido poli-perflorosulfónico, reduzindo assim a possibilidade de corrosão [13].

Nestas membranas o hidrogénio é fornecido ao ânodo no catalisador, fazendo com que haja a libertação dos eletrões dos átomos de hidrogénio tornando-se iões de H^+. De outro modo, o cátodo é alimentado com oxigénio e com os eletrões libertados anteriormente, que ao reagirem originam água líquida, H_2O. O exemplo disto pode-se observar na figura 2.9 [13].

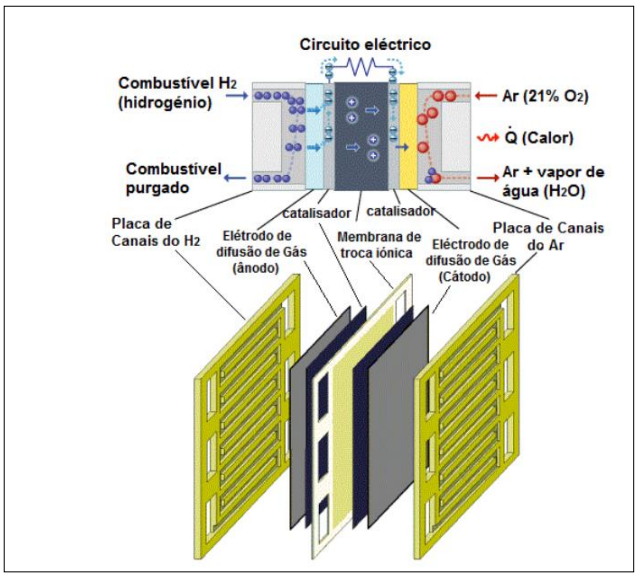


Figura 2.9 – Pilha de Combustível com Membrana de Permuta de Protões [13]

Nesta pilha as reações químicas são as seguintes [14]:

Cátodo: Elétrodo Positivo

$$O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2O\ (l)$$

Ânodo: Elétrodo Negativo

$$2H_2(g) \leftrightarrow 4H^+ + 4e^-$$

2.1.2.1.2. Pilha de Combustível Alcalina (AFC)

Esta pilha apresenta potências de saída entre os 300 W e os 5 kW, conseguindo atingir rendimentos até 70%. A pilha de combustível alcalina, ao invés da PEMFC, trabalha com temperaturas elevadas que variam entre os 150ºC e os 200ºC [13].

O eletrólito desta célula é uma solução aquosa de hidróxido de potássio alcalino que aumenta a velocidade da reação no cátodo, aumentado assim a eficiência desta célula. Este conduz os iões OH^- do cátodo para o ânodo, sendo um processo oposto ao do que ocorre em células como a PEMFC conforme se pode observar na figura 2.10 [13].

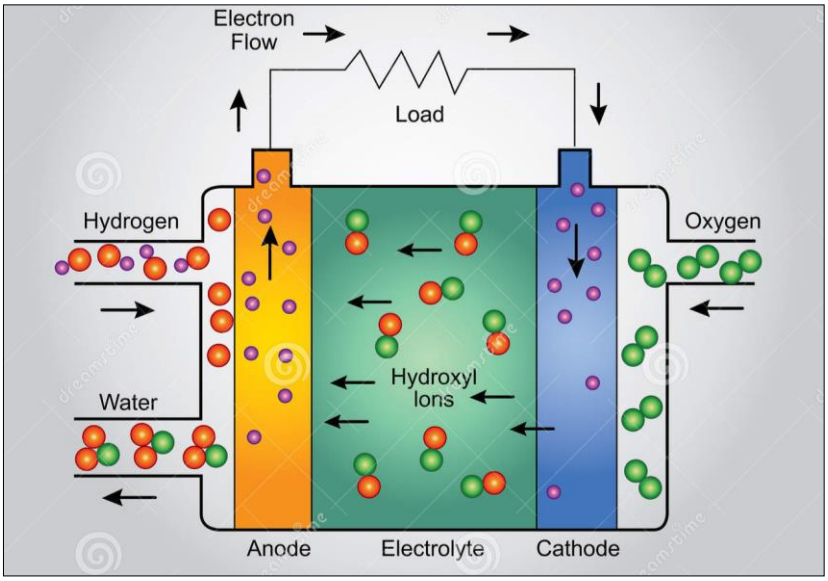


Figura 2.10 – Pilha de Combustível Alcalina (AFC) [14]

Os eletrólitos podem ser móveis ou imóveis, sendo que os eletrólitos de iões móveis utilizam continuamente o fluido eletrolítico que circula entre os elétrodos. No caso de iões imóveis existe um elétrodo que consiste numa pasta espessa que é retida por forças capilares dentro de uma matiz porosa de amiantos [13].

Nesta pilha as reações químicas são as seguintes [14]:

Cátodo: Elétrodo Positivo

$$\frac{1}{2}O_2(g) + H_2O(l) + 2e^- \leftrightarrow 2OH^-(aq)$$

Ânodo: Elétrodo Negativo

$$2OH^-(aq) + H_2(g) \leftrightarrow 2H_2O\ (l) + 2e^-$$

2.1.2.1.3. Pilha de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)

Esta pilha apresenta potências de saída que podem atingir 200 kW. Converte eletricidade com um rendimento maior que 40%, onde 85% do vapor produzido é utilizado na cogeração [13].
Como acontece com a célula AFC, esta célula trabalha a temperaturas que variam de 150 a 200ºC [13].

Os iões H^+ atravessam o eletrólito do ânodo para o cátodo através da reação atrativa do hidrogénio com o oxigénio. Por outro lado, os eletrões são forçados a circular por um circuito externo, este processo pode observar na figura 2.11 [14].

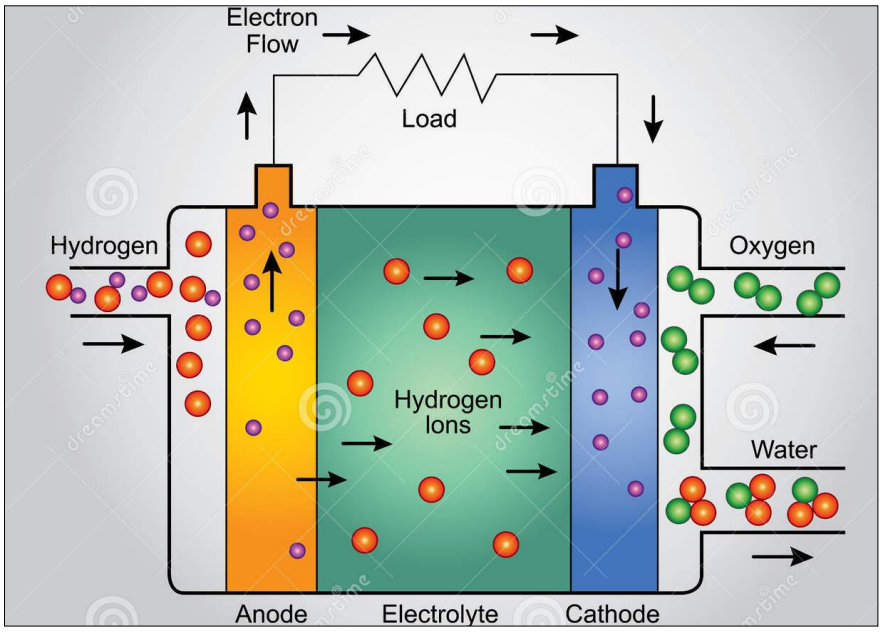


Figura 2.11 – Pilha de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC) [14]

Nesta pilha as reações químicas são as seguintes [14]:

Cátodo: Elétrodo Positivo

$$O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2O\ (l)$$

Ânodo: Elétrodo Negativo

$$2H_2\ (g) \leftrightarrow\ 4H^+ + 4e^-$$

2.1.2.1.4. Pilha de Combustível de Metanol Direto (DMFC)

Como acontece com as pilhas PEMFC, esta pilha recorre a uma membrana de polímero como eletrólito, contudo o catalisador do ânodo retira o hidrogénio do metanol líquido sem que haja necessidade de um reformador. Esta célula trabalha a temperaturas que variam entre os 50ºC e 100ºC apresentando uma eficiência de cerca de 40% [13].

Nesta pilha os protões produzidos no ânodo passam pelo eletrólito de polímero para o cátodo. De outro modo, os eletrões são forçados a circular pelo circuito externo onde podem ser utilizados para produzir trabalho, como se pode observar na figura 2.12 [14].

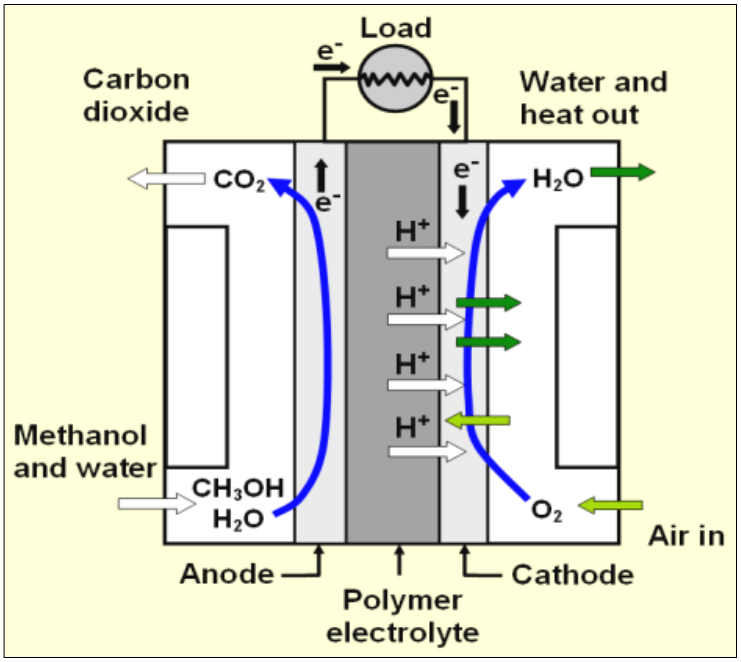


Figura 2.12 – Pilha de Combustível de Metanol Direto (DMFC) [14]

Nesta pilha as reações químicas são as seguintes [14]:

Cátodo: Elétrodo Positivo

$$1{,}5O_2 + 6H^+ + 6e^- \leftrightarrow 3H_2O$$

Ânodo: Elétrodo Negativo

$$CH_3OH + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$$

2.1.2.1.5. Pilha de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)

Estas pilha são utilizadas em grande escala e a alta potência, podendo, porém, ser utilizadas em motores de veículos. No entanto, para isso, é necessária uma unidade auxiliar de energia (APU – *Auxiliary Power Unit*). O eletrólito é sólido, sendo normalmente usado um material cerâmico de óxido de zircónio com uma pequena quantidade de ítria [13].

Um dos grandes problemas desta pilha é a sua temperatura de operação, atingindo altas temperaturas que rondam os 1000ºC, podendo alcançar rendimentos até 60%, ou 85% em cogeração [13].

Os iões de O^{2-} movem-se do cátodo para o ânodo através do eletrólito pela reação de atração do hidrogénio e do monóxido de carbono ao oxigénio, enquanto os eletrões circulam por um circuito externo do ânodo para o cátodo, como se pode observar na figura 2.13 [14].

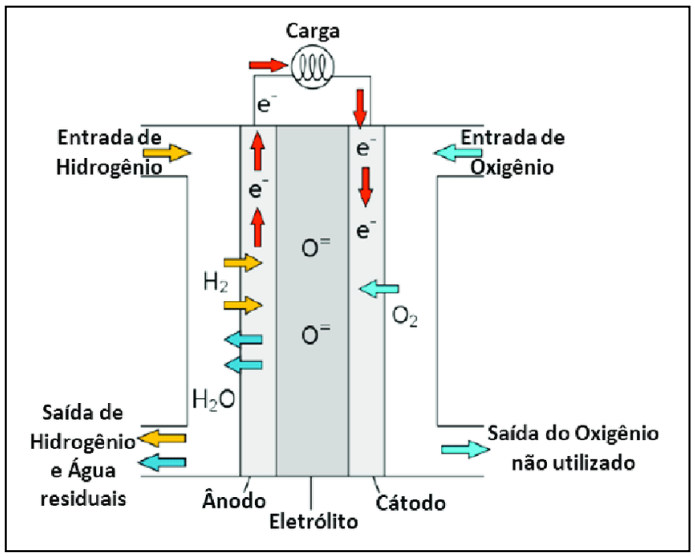


Figura 2.13 – Pilha de Combustível de Óxido Sólido (SOFC) [14]

Nesta pilha reações químicas são as seguintes [14]:

Cátodo: Elétrodo Positivo

$$\frac{1}{2}O_2(g) + 2e^- \leftrightarrow O^{2-}$$

Ânodo: Elétrodo Negativo

$$H_2(g) + O^{2-} \leftrightarrow H_2O\,(g) + 2e^-$$

$$CO(g) + O^{2-} \leftrightarrow CO_2(g) + 2e^-$$

$$CH_4(g) + 4O^{2-} \leftrightarrow CO_2(g) + H_2O\,(g) + 8e^-$$

2.1.2.1.5. Pilha de combustível de Carbonato Fundido (MCFC)

A pilha MCFC apresenta potências de saída que variam entre os 10 kW ao 2 MW. Possui um elétrodo constituído por uma solução líquida de carboneto de lítio, sódio ou potássio, apresentando eficiências que podem chegar aos 60% e aos 85% com cogeração. A mistura do eletrólito é mantida dentro de uma estrutura de material cerâmico de aluminato de lítio [13].

A temperatura de funcionamento destas células é na ordem dos 650 ºC, temperatura necessária para a condutividade suficiente do eletrólito. A condução dos iões faz-se pelo eletrólito do ânodo para o cátodo, no qual os iões de CO_3^{2-} são atraídos pela reação de atração do hidrogénio e do monóxido de carbono com o oxigénio. Por outro lado, os eletrões são forçados a circular por um circuito externo do ânodo para o cátodo, como se pode observar na figura 2.14 [14].

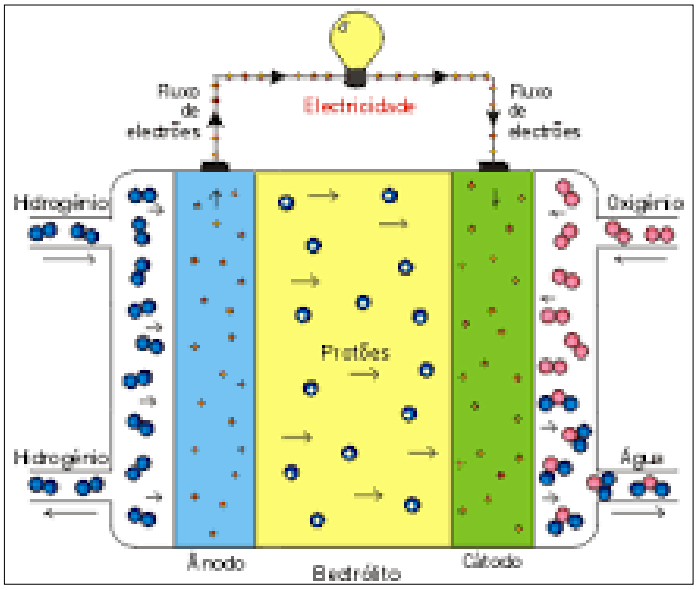


Figura 2.14 – Pilha de combustível de Carbonato Fundido (MCFC) [14]

Nesta pilha as reações químicas são as seguintes [14]:

Ânodo: Elétrodo Negativo

$$H_2(g) + CO_3^{2-} \leftrightarrow H_2O(g) + 2e^-(g) + CO_2(g)$$

$$CO(g) + CO_3^{2-} \leftrightarrow 2CO_2(g) + 2e^-$$

Cátodo: Elétrodo Positivo

$$\frac{1}{2}O_2(g) + CO_2(g) + 2e^- \leftrightarrow CO_3^{2-}$$

2.1.2.2. Tanque de hidrogénio de Alta Pressão

Estes tanques podem ser produzidos com a mesma tecnologia utilizada para o armazenamento de gás natural, sendo cilíndricos em forma de botijas, feitos de materiais como aço, alumínio ou polímero [14].

A pressão de compressão do hidrogénio destes veículos varia entre os 200 a 250 bar para tanques de capacidade de 50 litros. Caso o hidrogénio seja comprimido para utilização de grande escala, este pode atingir pressões que vão desde os 500-750 bar aumentando assim a densidade do armazenamento [15],[16].

Segundo o regulamento relativo à homologação de veículos a pilha de combustível, os reservatórios para armazenamento gasoso são classificados em quatro tipos:

1. Tipo 1: Reservatórios metálicos sem soldadura, pressão típica de 300 bar;
2. Tipo 2: Reservatório bobinado sobre a parte cilíndrica com um invólucro metálico com soldadura, pressão típica de 200 bar;
3. Tipo 3: Reservatório bobinado por inteiro com um involucro metálico sem soldadura, pressão típica de 700 bar;
4. Tipo 4: Reservatório bobinado por inteiro com um involucro não metálico, pressão típica de 700 bar.

Geralmente, em veículos como o *Toyota Mirai* os tanques utilizados são do tipo 4, conforme a figura 2.15, abaixo inserida.

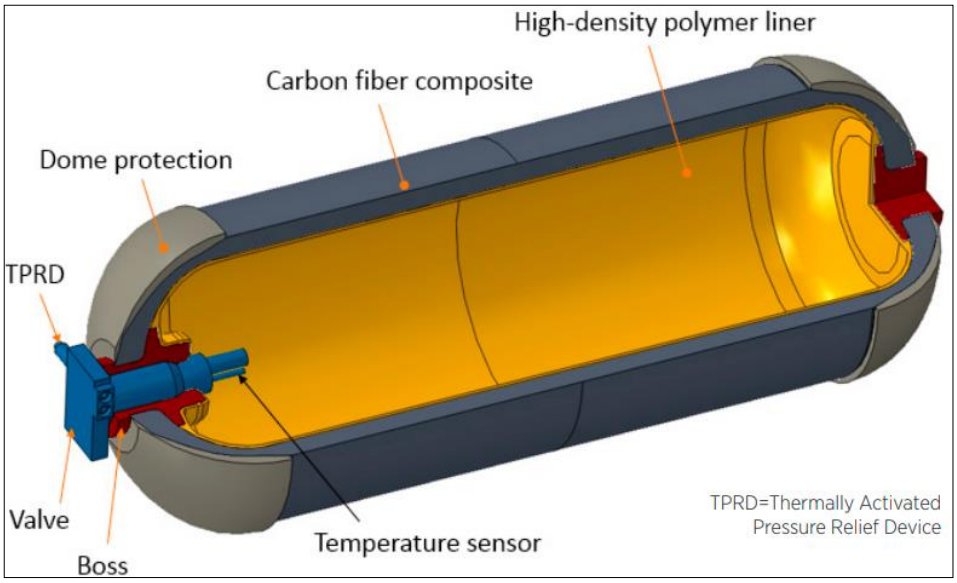


Figura 2.15 – Tanque de hidrogénio de Alta Pressão [16]

2.1.2.3. Bateria

A bateria destes veículos é composta por iões de lítio, permitindo armazenar e recuperar energia quando ocorre travagem regenerativa.

A bateria está ligada ao conversor que por sua vez está ligado a *fuel cell* ajudando, assim, quando existe necessidade de acelerar o veículo.

A composição desta bateria já se encontra descrita nesta dissertação no capítulo 2, subtítulo 2.1.1., que descreve a estrutura dos veículos elétricos a baterias.

2.1.2.4. *Fuel Cell Boost Convert*

Este componente permite aumentar a tensão de saída da *fuel cell* até aos 650 V. Este conversor é utilizado para obter tensões de saídas maiores que as tensões de entrada, conforme se pode observar pela figura 2.16 que diz respeito ao *fuel cell boost convert* do *Toyota Mirai* [4].

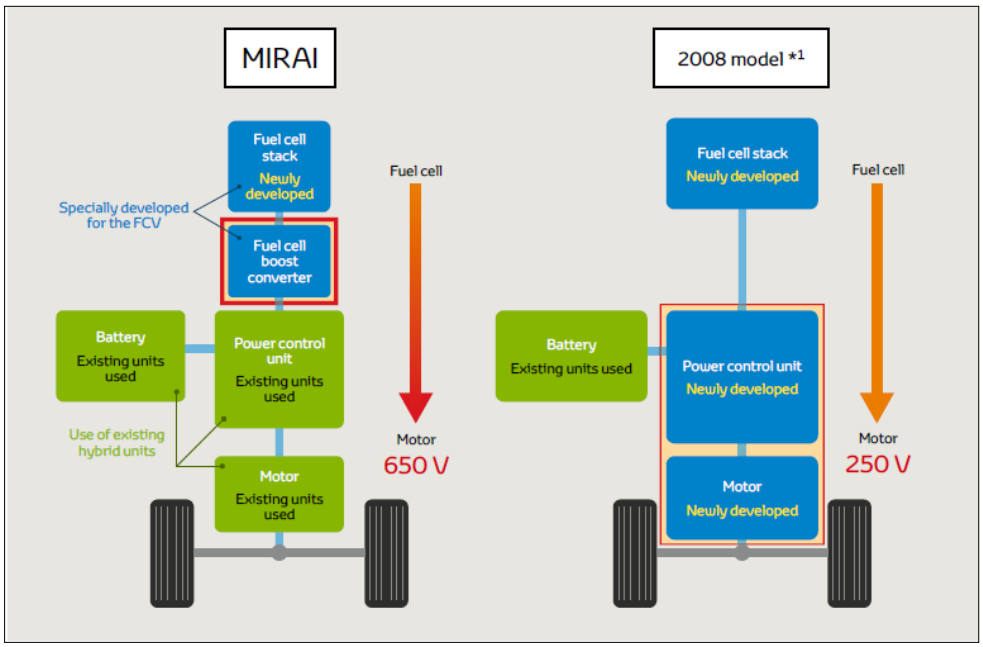


Figura 2.16 – *Fuel Cell Boost Convert* [4]

2.1.2.5. Motor Elétrico

O motor destes veículos é alimentado pela energia elétrica gerada tanto pela *fuel cell* como pela bateria elétrica.

A composição deste motor elétrico já se encontra descrita nesta dissertação no capítulo 2, subtítulo 2.1.1., que descreve a estrutura dos veículos elétricos a baterias.

2.1.3. Ciclo de Vida - Veículos Elétricos a Bateria

Neste subcapítulo definem-se as três fases do ciclo de vida deste veículo, sendo elas 1) a fase de produção, que engloba a fase de exploração de minérios/matérias-primas e a própria produção do veículo, 2) a fase de uso, que corresponde à fase em que o veículo é utilizado e 3) a fase de fim de vida, onde se identificam que materiais poderão ser reciclados e que métodos utilizar para esse efeito.

2.1.3.1. Fase de Matérias-Primas

Nesta fase estão presentes todos os elementos necessários para a produção do

veículo, é a fase onde se observa a extração dos minerais que produzem por exemplo as baterias, como é o caso do cobalto e do níquel e os semicondutores destes veículos [17].

Estes veículos recorrem a uma maior utilização de cobre e níquel comparativamente aos veículos convencionais a combustão. Por exemplo, um veículo elétrico a baterias utiliza cerca de quatro vezes mais cobre que um veículo a combustão [17].

Geralmente, o processo de fornecimento de matérias-primas inclui as etapas de extração, separação e refinação. Neste processo são gastas grandes quantidades de água, energia e outras substâncias químicas, como amónia [17].

Atualmente, num ciclo de vida de um BEV estima-se que cerca de 20% das emissões de GEE estão relacionados com a produção de baterias. Habitualmente as baterias utilizadas nestes carros são as baterias de iões de lítio de densidades elevadas, já descritas nesta dissertação. No caso da produção do cobalto e do níquel, esta necessita de muita energia, resultando assim em altas emissões de GEE e SO_x [17].

Em relação aos GEE, a principal fonte destes gases são as emissões diretas de CO_2 e perfluorocarbonos provenientes da produção de alumínio. Nestes estão refletidas, também, as emissões tóxicas resultantes da mineração de cobre e níquel, que representam cerca de 70 a 75% do total, na fase da produção do veículo [17].
A figura 2.17, representa os elementos que fazem parte do veículo elétrico a bateria.

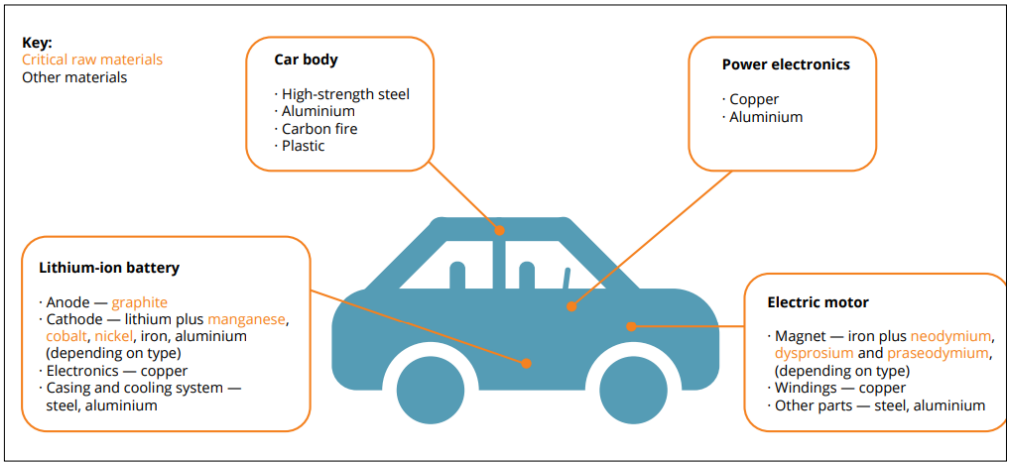


Figura 2.17 – Materiais usados na produção do BEV [17]

2.1.3.2. Fase de Produção

A fase de produção engloba todos os processos de assemblagem desde o processo de fabrico do chassi até aos testes finais do fabricante, antes deste ser transportado para retalho.

A medição das emissões de GEE, assim como os impactos da produção destes veículos, é medido por veículo produzido. Contudo, este tipo de avaliação apenas é significativo se for assumido que a vida útil e a manutenção dos veículos são iguais para todos os BEV [17].

Nesta fase, as emissões de GEE e poluentes atmosféricos estão relacionados com a grande quantidade de geração de eletricidade para a produção do veículo em causa, como acontece com a produção das baterias que são responsáveis pela maior proporção de uso de energia [17].

Estima-se que cerca de 10 a 75% da energia utilizada na produção dos veículos está relacionada com a bateria e que cerca de 10 a 75% das emissões de GEE estão relacionadas com a mesma causa. Tendo em conta os dados descritos estima-se que todas as etapas da produção das baterias representam cerca de 33 a 44% do total das emissões de GEE na fase de produção de um BEV [17].

No que refere aos outros componentes destes veículos, o motor elétrico apenas constitui 7 a 8% das emissões de GEE no total na fase de produção. Por outro lado, os restantes componentes, no total, representam valores de emissões que variam na ordem dos 35% [17].

Comparando a fase de produção com a fase de uso, se considerarmos que a energia usada para o carregamento destes veículos é feita através de fontes de energia renovável, a fase de produção pode ser responsável por até 75% das emissões de GEE tendo em conta todo o ciclo de vida do veículo. A figura 2.18 representa e evolução da produção mundial de BEV entre os anos 2010 a 2017 [17].

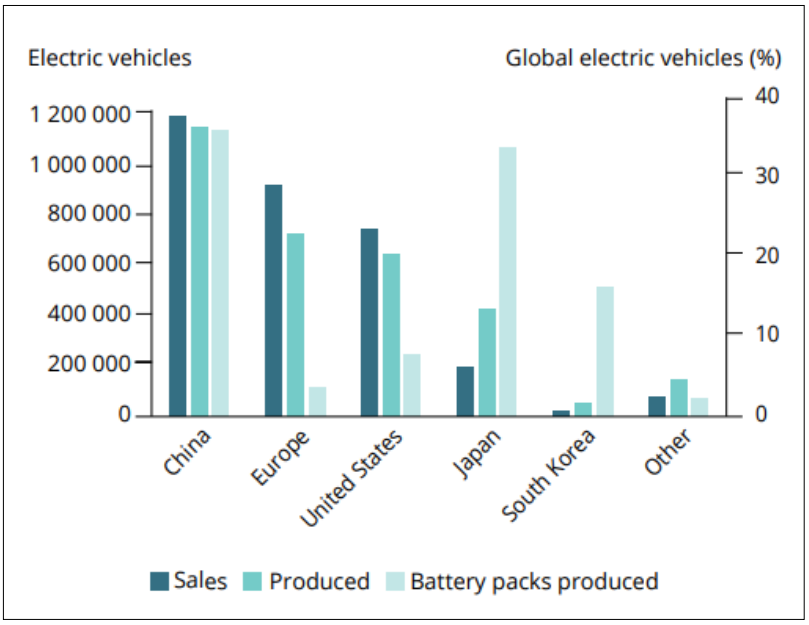


Figura 2.18 – Produção Mundial de Veículos Elétricos entre 2010-2017 [17]

Na fase de produção do veículo as principais emissões de GEE, assim como as partículas de SO_2, NO_x, PM e outros poluentes, estão relacionados com o uso de energia na fabricação de componentes e montagem de veículos. Desta forma, estima-se que são libertadas cerca de sete toneladas de CO_2 na produção de um modelo de um veículo ligeiro de passageiros [17].

2.1.3.3. Fase de Uso

Nesta fase, estes veículos têm como característica a não emissão de GEE, contudo é necessário analisar os impactes ambientais provocados com o uso destes veículos. Estes impactos, estão relacionados com os carregamentos efetuados pelo veículo ao longo da sua vida útil, dependendo do *mix* energético de cada país, sendo calculados através dos quilómetros percorridos durante um determinado período, ou seja, o total de impacto é obtido pela multiplicação dos impactos por quilómetro pelos quilómetros percorridos pelo veículo.

Os impactos descritos estão relacionados com fatores como:

1. Fontes de geração de eletricidade;
2. Características dos veículos;
3. Estilo de condução e localização;
4. Padrões de carregamento (lento, normal e rápido).

No ano de 2015 e tendo em conta o ciclo de vida WTW a média de emissões de um BEV variava entre os 60 a 76 gCO_2e/km, sendo este valor relacionado com o espetro energético dos países europeus nesse ano. Contudo, estes valores são cerca de 47 a 58% inferiores às emissões emitidas por um veículo a combustão [18].

A figura 2.19 representa o ciclo de vida de um BEV fazendo ressaltar o ciclo WTW que terá mais enfâse nesta dissertação.

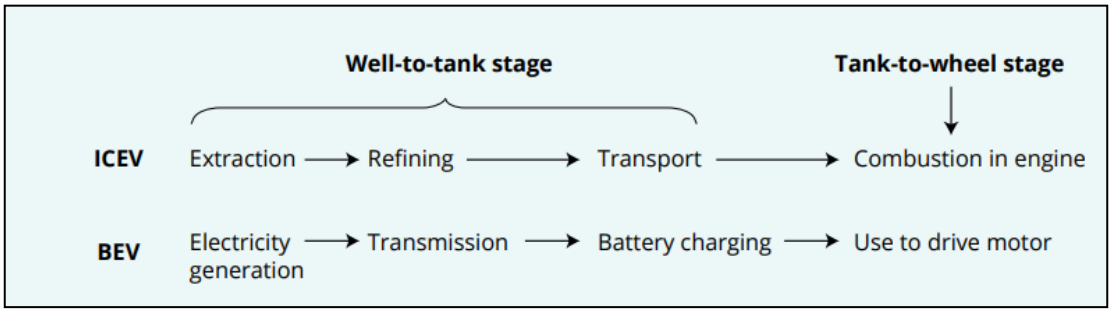


Figura 2.19 – Ciclo de Vida WTT e TTW [17]

2.1.3.4. Fase de Fim de Vida

A fase de fim de vida de um veículo, caso fosse analisada de forma isolada, e caso se procedesse à reciclagem de todos os componentes, seria a fase que menos emitiria GEE no ciclo de vida de um veículo. Porém, assim como a fase de exploração, é considerada uma das fases que mais apresenta emissões de GEE, devido ao facto de certos componentes dos veículos serem descartados, tais como a bateria. Esta, no seu processo de recuperação/reciclagem, liberta quantidades de GEE significativas [17].

Nesta fase encontra-se, também, um dos grandes dilemas da mobilidade elétrica, ou seja, com o fim de vida do veículo muitas vezes as baterias destes não se encontram em estado aceitável para serem reutilizadas, desta forma são descartadas, provocando assim maiores emissões de GEE nesta fase.

Desde 2000 existe uma diretiva (*Diretiva de Fim de Vida de Veículos* (2000/53/EC)) que define os processos de fim de vida de um veículo seja de combustão interna ou a bateria. Esta diretiva exige que os fabricantes de veículos sejam responsáveis pelos seus veículos após o uso destes. Uma das exigências define que os fabricantes são responsáveis financeiramente ou fisicamente por recuperar os veículos de modo a serem reutilizados/reciclados, ou, em alternativa, são obrigados a delegar a responsabilidade a terceiros [17].

Segundo a *Diretiva de Fim de Vida de Veículos,* em 2015, 95% dos veículos em fim de vida deveriam ser reutilizados e recuperados e cerca de 85% reutilizados e reciclados. Para isso a diretiva sugere as seguintes definições [17]:

1. **Reutilização:** Qualquer operação na qual um produto em fim de vida, como componentes do veículo, pode ser utilizado para a mesma finalidade para a qual foi feito originalmente.
2. **Recuperação:** Segundo o anexo II B da diretiva 75/442/CEE prevê a recuperação de metais e compostos metálicos, materiais inorgânicos e componentes usados para permitir a redução da poluição e reutilização de óleos.
3. **Reciclagem**: Prevê-se o reprocessamento de materiais residuais para a finalidade original ou para uma finalidade diferente.

Em termos de fim de vida da bateria destes veículos, existe uma diretiva (2006/66/EC) que define o procedimento a que se deve recorrer, a qual visa minimizar os impactos das baterias e dos resíduos destas em relação ao meio ambiente estabelecendo, desta forma, requisitos para que as diferentes baterias sejam recicladas. No caso dos veículos elétricos as baterias destes estão incluídas no grupo das baterias industriais [17].

Os processos para reciclar baterias da categoria das baterias industriais geralmente envolvem três operações unitárias [17]:

1. Separação Mecânica;
2. Tratamento Pirometalúrgico;
3. Tratamento Hidrometalúrgico.

Habitualmente, as baterias dos veículos elétricos tipicamente chegam ao fim da sua vida útil para uso em veículos após 8 a 10 anos ou 150.000 a 200.000 km, quando a sua capacidade diminui cerca de 20%. A figura 2.20, representa o ciclo de vida da bateria tendo em conta a fase de extração até à fase de fim de vida da mesma [17].

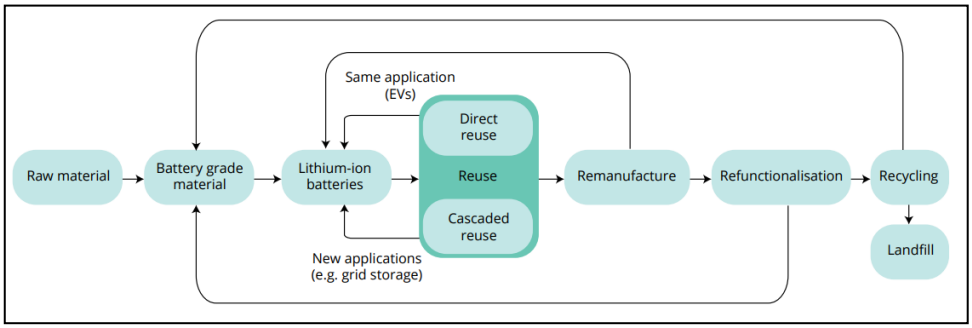


Figura 2.20 – Ciclo de Vida da bateria [17]

2.1.4. Ciclo de Vida - Veículos Elétricos a Pilha de Combustível

2.1.4.1. Fase de Matérias-Primas

Estima-se que a produção anual de hidrogénio é cerca de 50 milhões de toneladas. Destes 50 milhões cerca de 48 % da produção é feita a partir do gás natural, cerca de 30% da produção é feita através de gases residuais de refinaria, cerca de 18% é feita a partir do carvão e, por fim, cerca de 4% a partir da biomassa e por eletrólise [19].

Para a produção de um 1 kg de hidrogénio (H_2) são necessários cerca de 3,17 kg de gás natural. Estima-se que num ciclo de vida de um veículo elétrico a pilha de combustível sejam utilizados cerca de 9840 kg de hidrogénio produzidos através do gás natural gastando, assim, cerca de 3450 kWh de energia elétrica no processo da eletrolise [19].

Quando se trata da produção de hidrogénio através do processo de eletrólise, em 2015, tendo em conta a produção de energia de cada país, estimava-se que a produção de cerca de 1 kg de hidrogénio gerava cerca de 12,13 kg de CO_2 estimando também que durante o ciclo de vida deste veículo geraria cerca de 37640 kg de CO_2 [19].

Relativamente à produção do hidrogénio através do carvão estima-se que para a produção de 1 kg são emitidas cerca de 24,2 kg de CO_2, por outro lado para a produção de 1 kg de hidrogénio através do gás natural são emitidas cerca de 3,17 kg [19].

Por último, para produzir 1 kg de hidrogénio a partir da biomassa como madeira, palha, entre outros, são emitidas cerca de 13,5 kg de CO_2 [19].

2.1.4.2. Fase de Produção

Nesta fase as peças de veículo são normalmente fabricadas e montadas em vários locais. Porém, estima-se que na fase de produção as emissões de GEE são nestes carros inferiores comparados com os BEV, com capacidades de bateria que podem ir dos 60 aos 90 kWh [20].

Um dos principais responsáveis pelas maiores emissões de GEE é a platina que constitui o catalisador, fazendo com que cerca de 60% das emissões do ciclo de vida deste veículo estejam relacionados com este produto. Caso se considere a produção da bateria, bem como o tanque de H_2 este valor de emissões pode chegar a cerca de 85% [15].

Para além do catalisador da célula de combustível, estima-se que cerca 11900 kWh de energia é gasta para a produção do chassi e cerca de 15% do valor da produção do chassi é utilizado para a produção das restantes peças do veículo [15].

2.1.4.3. Fase de Uso

De acordo com vários estudos acerca do ciclo de vida dos FCEV, todos relatam que as emissões de GEE são nulas em todos os modelos existentes no mercado, porém na fase de uso deve-se ter em conta a forma como é produzido o combustível, neste caso o hidrogénio como já referido neste trabalho, tal como poderá ser observado na figura 2.21 [16].

Well-To-Tank (WTT)				Tank-To-Wheel (TTW)		
CO_2 Emission (kg CO_2 per 5 kg Tank Hydrogen)				CO_2 Emission (kg CO_2 per 5 kg Tank Hydrogen)		
Hydrogen production pathways	Fuel Production Cycle					
	Hydrogen (Toyota)	ICEV (Gasoline)	PHEV (Hybrid)	Hydrogen (Toyota)	ICEV (Gasoline)	PHEV (Hybrid)
NG	70.7	35.7	20.8	0	202.3	101
RE	11.9			0		

Figura 2.21 – Fase de Uso dos FCEV, RE – *Renewable Electrolysis*, NG – Natural Gás [16]

2.1.4.4. Fase de Fim de Vida

No que diz respeito às células de combustível, à data de 2018 não possuíam nenhuma regulamentação específica. Contudo, existem processos que permitem realizar a reciclagem das pilhas de combustíveis, sendo eles [21]:

- Método Hidrometalúrgico: designa processos de extração de metais nos quais a principal etapa de separação metal-ganga envolve reações de dissolução do mineral-minério (contendo os metais de interesse) em meio aquoso.
- Método Pirometalúrgico: Consiste na envolvência de um processo de combustão na qual a membrana difusora de gases, ou em inglês, *Gas Diffusion Layer*, GDL, e elétrodos são incinerados. Desta forma, as cinzas resultantes são processadas por dissolução.

No caso da pilha de combustível usada nestes veículos, o processo utilizado é o hidrometalúrgico conforme se pode observar na figura 2.22.

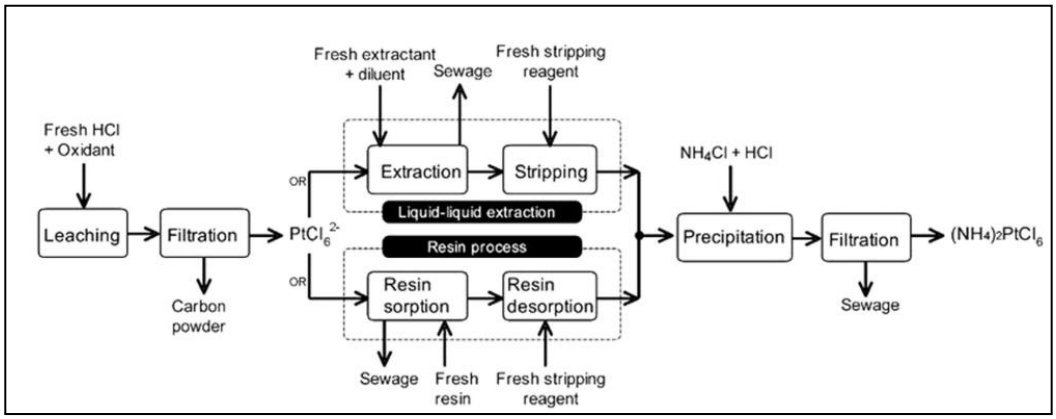


Figura 2.22 – Método Hidrometalúrgico [21]

2.2. Revisão Bibliográfica

De forma a ser possível a realização desta dissertação, foi necessário realizar se uma revisão da bibliografia que servirá de base para esta dissertação. Esta revisão debruça-se acerca dos ciclos de vida dos veículos, onde se verificam conclusões relativamente a elementos como os inventários dos ciclos de vida de cada veículo, as fases do ciclo de vida e as emissões que cada fase poderá emitir, tendo em conta os mix energéticos para a produção destes veículos.

Como já referido nesta dissertação, esta baseia-se nos veículos elétricos a bateria e veículos elétricos a pilha de combustível. Desta forma, todos os elementos em estudo e os resultados obtidos serão relacionados com os mesmos.

2.2.1. Estudo Ciclo de vida – Veículo Elétrico a Bateria, BEV

De forma a melhor compreender as emissões dos ciclos de vida destes veículos, foi realizada uma análise aprofundada de artigos científicos [22] e [23].

Em ambos os artigos são analisados os ciclos de vida dos veículos elétricos (no caso do artigo [23] destaca-se o veículo *Tesla® Model 3*), considerando-se diversos elementos como se pode observar na tabela 2.1.

Tabela 2.1– Análise dos Artigos Científicos - BEV

Estudo	Mix Energético	Tempo de Vida (km)	Veículo	Fases Ciclo de Vida	Software Utilizado
[23]	China 2019	150.000	BEV	Produção, Uso, Fim de Vida	GREET
[22]	China 2019 a 2050 EU 2019 a 2050 Canada 2019 a 2050	150.000	BEV	Produção, transporte e uso	GREET/Simapro 9.1

No caso do artigo [23], o objetivo é a análise das emissões de GEE no *Tesla® Model 3*, sendo realizado nas fases de produção, uso e fim de vida do ciclo de vida deste veículo.

O método usado neste artigo para a análise das emissões de GEE, foi a análise do ciclo de vida do veículo em causa, usando o programa *GREET*. Para a simulação teve-se em conta o mix energético da China no ano 2019, em que cerca de 69% da energia produzida neste país teve origem fóssil como o carvão [24].
Deste modo, neste estudo foram obtidos os resultados observados na figura 2.2.

Tabela 2.2 – Resultados do LCA do *Tesla® Model 3* [23]

Fase de Ciclo de Vida	Emissões de GEE	Unidade
Exploração de Minérios	0,062	$kgCO_2e/km$
Fase de Produção	0,010	$kgCO_2e/km$
Fase de Uso	0,304	$kgCO_2e/km$
Total	0,376	$kgCO_2e/km$

Ou seja, cerca de 81% das emissões de GEE deste veículo estão concentradas na fase de uso do mesmo, sendo que apenas 16% se relacionam com a exploração de minérios, e apenas 3% se referem à fase de produção.

Tendo em conta o total de 0,376 kgCO_2e/km em emissões de GEE do veículo em estudo, e comparando com outros veículos ligeiros de passageiros de combustão interna, verifica-se que o *Tesla ® Model 3* apresenta uma maior emissão de GEE. Ou seja, quanto maior for a percentagem de fontes fósseis no mix energético de um país maior irão ser as emissões emitidas por estes veículos nos seus ciclos de vida.

Da mesma forma, no caso do artigo [22] o objetivo foi a comparação dos ciclos de vida dos BEV em 10 países, tendo em conta os cenários energéticos de cada país, tais como Canadá, China e países da União Europeia: Alemanha, Suécia República Checa e Dinamarca. Foram considerados não só os cenários do ano do presente artigo 2019, mas também cenários futuros de 2030 e 2050, dando ênfase aos resultados obtidos nos anos 2030 e 2050. Assim apresentam a pegada ambiental das fases de produção, transporte e uso do mesmo.

No caso deste artigo, o veículo elétrico em destaque é o *Audi A3*, com uma bateria de capacidade de 100 kWh.

Da mesma forma, tal como ocorrido no artigo [22], a metodologia utilizada neste artigo recorreu ao software *GREET* e as bases de dados como *ECOINVENT/ELCD, USLCI* e *industrial data 2.0 databases*. A base de dados *ECOINVENT/*ELCD permite adquirir um conhecimento mais profundo acerca dos impactos ambientais dos seus produtos e serviços, sendo um repositório que engloba diversos sectores a um nível global e regional, modelando atividades e/ou processos humanos. Por outro lado, o *industrial data 2.0 databases* contém mais de 300 conjuntos de dados recolhidos através de associações industriais, tais como *Plastics Europe*, *ERASM*, *World Steel*, *International Molybdenum Association*, and the *Alliance for Beverage Cartons and the Environment*. Esta base de dados é integrada no software *SIMAPRO.*

Os dados obtidos nas bases de dados em cima citadas permitiram obter os mix energéticos dos países em causa usando o software *SIMAPRO*. Este software é usado por várias empresas para analises de ciclos de vida de diversos produtos. Permite realizar inventários, analisar e monitorar os ciclos de vida de um produto que se pretende analisar obtendo assim relatórios de sustentabilidade, determinação das

emissões de GEE e elaboração de declarações ambientais de produtos determinando assim os principais indicadores de desempenho.

Desta forma, obtiveram-se resultados referentes às emissões de GEE do ciclo de vida dos BEV para os anos 2030 e 2050, descritos na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resultados das emissões de GEE dos LCA dos BEV entre [2030 e 2050] [21]

GWP (kg CO_{2eq}/km)		
Países	2030	2050
Polónia	----------	0,172
República Checa	----------	0,146
Alemanha	----------	Valor similares à Polónia e República Checa segundo o Artigo [21]
Coreia do Sul	0,23	----------
Canada	0,11	----------

Ou seja, para 2050 em países como a Polónia e República Checa, prevêem-se valores de potencial aquecimento global, ou em inglês, *Global Warming Potential* (GWP) de 0,172 kgCO_2/km e 0,146 kgCO_2/km respetivamente, valores que segundo o artigo são similares aos valores obtidos para a Alemanha. Já no caso do Canadá prevê-se que para 2030 os valores de emissões de GEE serão de 0,110 kg $C0_2$/km.

Neste mesmo artigo é referido que um estudo recente em Espanha prevê que o GWP poderá variar entre os valores de 0,135 e 0,098 kgCO_2/km, para cenários futuros de mix energéticos com elevadas percentagens de fontes renováveis.

Em todos os casos nas emissões do ciclo de vida destes veículos obtiveram-se as seguintes conclusões:

1. 1 a 4% das emissões de GEE da fase de produção encontram-se na produção bateria de chumbo e fluídos do veículo;
2. 45% das emissões de GEE da fase de produção encontram-se na produção da bateria de lítio;
3. 8 a 18% das emissões de GEE da fase de produção encontram-se na produção

da carroçaria do veículo.

Desta forma e analisando os artigos em causa conclui-se que as emissões de GEE são proporcionais aos mix energéticos de cada país e que quanto mais energias de fontes renováveis utilizadas menor serão as emissões dos GEE no ciclo de vida destes veículos.

O Artigo [25] teve como objetivo comparar as emissões de GEE libertadas por um veículo a Diesel e por um BEV, em todo o seu ciclo de vida. Para além disso, analisou as emissões do BEV num sistema totalmente renovável futuro.

Segundo Hoekstra [25] esta tecnologia atual poderia eletrificar 70% dos transportes conduzindo a uma redução elevada nas emissões de GEE.

Estudos recentes que envolvem a produção de BEV fazem referência a valores de emissões de GEE para a produção da bateria de 16 gCO_2/km, e um valor de 24 gCO_2/km para a restante fase produção do veículo.

Considerado um cenário especulativo em que consideraram um mix energético constituído por 100% fontes renováveis, neste artigo conclui-se que no total as emissões de GEE do ciclo de vida do Tesla Model 3 de 74 kWh seriam de 10 gCO_2/km ou 0,010 $kgCO_2$/km. Do total das emissões de GEE, cerca de 6 gCO_2/km correspondem à fase de uso do veículo e cerca de 4 gCO_2/km correspondem à fase de produção.

De modo a demonstrar a diferença entre o mix 100% renovável e os mix com fontes renováveis e não renováveis, este artigo refere que consoante o mix energético as emissões de GEE variam. Tendo em conta que o tempo útil de vida destes veículos é de 17 anos e que estimaram que no primeiro ano estes veículos realizam cerca de 26 000 quilómetros, usando o mix energético da UE-28 as emissões de GEE do ciclo de vida destes veículos eram de 95 gCO_2/km e que usando o mix energético da Alemanha as emissões de GEE do ciclo de vida deste veículo variavam entre os 189 e os214 gCO_2/km.

Desta forma, conclui-se que tal como se sucedeu neste artigo, ao especular o uso de

um mix energético constituído por 100% fontes renováveis, as emissões de GEE do BEV poderão atingir valores até 10 gCO_2/km ou 0,010 kgCO_2/km.

O artigo [26] pretende analisar as emissões de GEE dos veículos elétricos a bateria e dos veículos elétricos a pilha de combustível com autonomia superior a 300 km.

Dos vários estudos realizados neste artigo, para o desenvolvimento desta dissertação analisou-se com maior ênfase os dados obtidos dos BEV, com capacidade de 60 kWh e de 90 kWh, através da utilização de energia solar para a realização dos carregamentos destes veículos assim como a sua influência no mix energético do país, neste caso da Alemanha. O estudo deste mix energético é de extrema importância para análise das emissões de GEE obtidas na fase de produção destes veículos, uma vez que quanto maior for a utilização de energias renováveis no mix energético, menor serão as emissões de GEE no ciclo de vida destes veículos.

Desta forma, de modo a ser possível verificar o efeito da variação do mix energético nas emissões de GEE com a variação das capacidades da bateria destes veículos, o artigo define duas bases de tempo, de 2020 a 2030 e de 2030 a 2040. Para o intervalo de tempo de 2020 a 2030considerou-se que as emissões por produção de um kWh de energia era 805 g CO_{2eq}/kWh e que para o intervalo de tempo de 2030 a 2040 considerou-se que as mesmas emissões seriam 335 g CO_{2eq}/kWh. Deste modo, esta variação no mix energético dos diferentes intervalos de tempo faz-se refletir nas emissões de GEE na fase de produção do veículo.

Considerando que as baterias são produzidas na mesma base de tempo seja entre 2020 e 2030 ou entre 2030 e 2040, pode-se observar que existe uma relação linear entre o aumento das emissões de GEE e o aumento das capacidades das baterias do BEV. Deste modo, observa-se que para a mesma base temporal com o aumento de 30 kWh na capacidade de bateria verifica-se um aumento de 60% das emissões de GEE. Este acontecimento ocorre em ambas as bases temporais, tendo em conta os diferentes mix energéticos entre as mesmas, conforme se pode observar pelas tabelas 2.4 e 2.5.

Tabela 2.4 – Variação das Emissões de GEE entre [2020 a 2030] [26]

Base Temporal [2020 a 2030]		
Capacidade da Bateria (kWh)	Emissões de GEE ($kgCO_2e/km$)	Razão de aumento de Emissões de GEE (%)
60	0,06	60
90	0,1	

Tabela 2.5 – Variação das Emissões de GEE entre [2030 a 2040] [26]

Base Temporal [2030 a 2040]		
Capacidade da Bateria (kWh)	Emissões de GEE ($kg\ CO_2e/km$)	Razão de aumento de Emissões de GEE (%)
60	0,03	60
90	0,05	

Tendo em conta as tabelas 2.4 e 2.5, pode-se assumir que para a mesma base temporal observa-se um crescimento linear entre o aumento da capacidade das baterias com o aumento das emissões de GEE, com uma razão de crescimento de 60%.

2.2.2. Estudo Ciclo de vida – Veículo Elétrico a Pilha de Combustível, FCEV

O FCEV é um veículo elétrico que levanta grandes expectativas no que diz respeito à mobilidade elétrica. Designado, por vários fabricantes, como o veículo que liberta água como resultado da sua combustão interna, este tipo de veículo apresenta baixas emissões de GEE, muitas vezes inferiores aos BEV, dependendo do *mix* energético com que se produz o seu combustível, neste caso o hidrogénio.

O artigo [15] apresenta como objetivo a análise da pegada de carbono do ciclo de vida do H_2 renovável para uso no transporte de veículos de passageiros na Califórnia,

em projetos que utilizam sistemas 100% de fontes solares e sistemas 75% híbridos de energia solar e energia eólica, na fase de produção de hidrogénio pelo processo de eletrólise.

A metodologia utilizada para a realização deste artigo teve em conta as seguintes premissas:

1. **Norte da Califórnia:** Utilização de energia solar para produção de H_2 através do processo de eletrólise;
2. **Sul da Califórnia:** Utilização de um sistema híbrido com sistema solar e sistema eólico, fornecendo cerca de três quartos da eletricidade exigida anualmente para a produção de H_2 através do processo de eletrólise com 35% solar, 40% eólica e 25% mix energético da Califórnia.

Relativamente ao mix energético da Califórnia considerado neste artigo para a realização do estudo no sul da Califórnia, destaca-se que cerca de 45,2% da energia produzida nesse ano tinha origem em gás natural e cerca de 4,4% tinha origem em carvão.
Tanto estes dados sobre o mix energético como os dados relativos às fontes solar e eólica foram retirados da base de dados *Ecoinvent 3.6,* de modo a ser possível simular para ambos os casos as emissões de GEE através do Software *SIMAPRO 9.*

Os resultados obtidos no estudo, podem ser observados na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resultados obtidos para o Sul e Norte da Califórnia [15]

Caso	Resultados
Norte da Califórnia	85% das emissões de GEE do ciclo de vida de FCEV com H_2 verde, está relacionada com o ciclo do veículo (sistema de tração, bateria, tanque de armazenamento e célula de combustível)
	O chassi e o sistema de tração representam uma emissão de GEE de cerca de 63 gCO2eq/km
Sul da Califórnia	As emissões de GEE na produção por eletrolise são de 77 gCO2eq/kWh.

Curiosamente este artigo menciona que caso o estudo efetuado no Sul da Califórnia fosse aplicado com 100% de energia solar, as emissões de GEE no ciclo do de vida de FCEV de H_2 verde seriam ligeiramente menores do que no norte (104 gCO_{2eq}/km comparativamente aos 105 gCO_{2eq}/km) porque o sul tem capacidade de produção PV de 35% e o Norte de 30%.

Desta forma e como já podemos observar na análise dos artigos realizados para os BEV, as emissões de GEE destes veículos são proporcionais às fontes de energia para a produção e utilização dos mesmos, assim como a capacidade de os países gerarem energia verde através de fontes renováveis, como se pode observar na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Resultados obtidos – Ciclo de vida do FCEV. [15]

Caso	Fonte Energética	Resultados
Norte Califórnia (gCO_{2eq}/km)	100% Energia Solar	105
Sul Califórnia (gCO_{2eq}/km)	75% Energia Solar + 25% Mix da Califórnia	149
GREET – Eletrolise (gCO_{2eq}/km)	100% solar	116

Comparando o caso Sul com o caso Norte da Califonia, o caso norte apresenta uma redução das emissões de GEE do ciclo de vida do FCEV de cerca 44 gCO2eq/km, uma vez que no caso Sul a percentagem de energia solar é de 75% e 25% tem origem no mix da Califórnia.

Por outro lado, o artigo [16] apresenta como objetivo a análise do ciclo de vida para comparação das emissões de GEE entre os BEV e os FCEV, usando para os BEV o *Tesla Model 3* e para os FCEV o *Toyota Mirai*.

Para esta análise foi utilizado o software GREET®. Desta forma foi possível a análise dos impactes ambientais através de todo o ciclo de vida dos veículos, incluindo a fase de produção e fim de vida, a análise WTW, a combustão do combustível, as não emissões de escape durante a utilização do veículo, estrada, desgaste dos travões, e

previsão e manutenção da estrada.

Assim, para o caso dos BEV, neste caso o *Model 3* nos Estados Unidos e tendo em conta o seu mix energético, verificou-se que as emissões na fase de uso deste veículo tendo em conta os carregamentos efetuados ao longo do seu ciclo de vida são de cerca, cerca de 74,56 gCO_2eq/km.

Relativamente ao FCEV, as vias de produção de hidrogénio são extremamente importantes para o cálculo das emissões do mesmo. No caso deste estudo considerou-se as vias de produção de hidrogénio utilizadas nos primeiros países onde foram lançados os veículos com estas tecnologia (UK, Alemanha e Dinamarca). As vias em causa são a reforma central provinda do gás natural canalizado da Rússia ou do Mar do Norte ou através do processo de eletrólise através de fontes de energias renováveis, neste caso fonte eólica.

Na tabela 2.6 podem-se observar as diferentes formas de produção de hidrogénio pelos diferentes países.

Tabela 2.6 – Vias de Produção de Hidrogénio [16]

Vias de Produção de Hidrogénio	
UK	100% Gás Natural do Mar do Norte
Dinamarca	100% de Eletrólise através de Energia Eólica
Alemanha	50% de Gás Natural do Mar do Norte/Rússia + 50% Eletrolise através de Energia Eólica

Tendo em conta os dados da tabela 2.6, o processo de eletrólise com energia 100% eólica neste estudo apresenta um ciclo de vida com emissões entre os 0,009 e os 0,018 kg de CO_2eq/kWh.

Os resultados obtidos neste artigo demonstram que as emissões de um FCEV dependem bastante dos mecanismos da produção do H_2. De acordo com os dados dos fabricantes, as emissões de CO_2 na fase de uso são de 0 $kgCO_2/km$ em todos os modelos FCEV.

A tabela 2.7 demonstra os resultados obtidos para os ciclos de WTT e WTW destes veículos tendo em conta a produção de H_2 através de gás natural ou energias renováveis.

Tabela 2.7 - Emissões de GEE (kgCO2) por 5 kg de tanque de H2 - Toyota Mirai [16]

	Emissões de GEE (kgCO2) por 5 kg de tanque de H2 - Toyota Mirai	
	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel
Gás Natural	70,7	0
Energias Renováveis	11,9	0

Ou seja, conforme se pode observar, considerando que a produção do hidrogénio é realizada através de energias renováveis verifica-se que as emissões de GEE do ciclo de vida do FCEV são cerca de 11,9 $kgCO_2$ por 5 kg de hidrogénio.

Conforme indicação do artigo, se considerarmos que o *Mirai* com 5 kg de hidrogénio apresenta uma autonomia de cerca de 500 km, facilmente conseguimos concluir que se por 500 km o veículo pelo método WTT apresenta o valor de emissões de GEE de 11,9 $kgCO_2$/500 km, então, por 1 km o valor de emissões de GEE será de 0,0238 $kgCO_2$/km.

Da mesma forma, como se sucedeu no artigo [20], a análise do ciclo de vida do combustível é extremamente importante, uma vez que podemos concluir que as emissões de GEE do ciclo de vida destes veículos são proporcionais ao mix energético do país, tanto para a produção do veículo como para a produção do combustível do mesmo.

Capítulo 3 – Metodologia

Neste capítulo realizou-se a comparação das emissões de GEE através dos ciclos de vida dos veículos elétricos a bateria e veículos elétricos a pilha de combustível. Como já referido nesta dissertação, para efeitos de simulações foi utilizado o programa *GREET* ®, considerando-se as características do veículo *Tesla* ® *Model 3* e as do veículo *Toyota*® *Mirai*. Na escolha destes dois veículos foi tido em conta que ambos tivessem a mesma categoria, neste caso, classe B, sendo, tanto o *Model 3* como o *Mirai*, considerados veículos ligeiros de passageiros. Considerou-se o ciclo de vida de cada um dos veículos sendo o inventário e a definição das fronteiras do sistema do ciclo vida. Por fim, igualmente referido na presente dissertação, recorreu-se à metodologia *"Well-to-Tank"* para comparar as emissões dos ciclos de vida de cada veículo.

3.1. Veículos Elétricos a Bateria

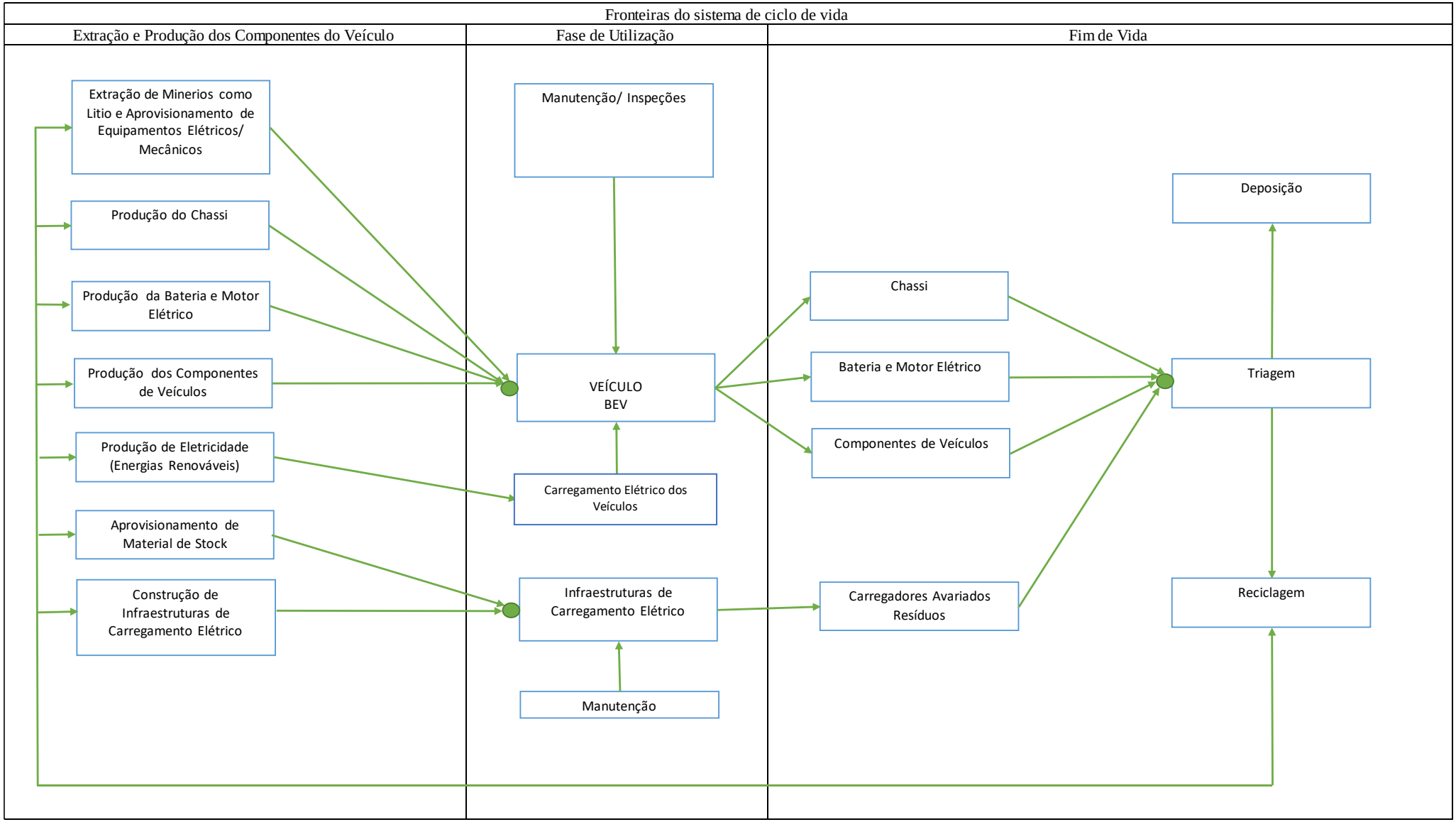
Tendo por base a ISO 14040 definiram-se as seguintes fronteiras do sistema para os veículos puramente elétricos:

1. Extração e Produção dos Componentes do Veículo;
2. Fase de Utilização;
3. Fim de Vida.

3.1.1. Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida

Depois de se realizar tanto as fases do ciclo de vida como os inventários das mesmas, pode-se então realizar as fronteiras do sistema do ciclo de vida, conforme se pode observar na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida do BEV.



3.1.2. Extração e Produção dos Componentes do Veículo

Na fase de extração e produção dos componentes do veículo são tidos em conta diversos elementos obtidos pelo inventário do ciclo de vida desta fase:

1. Extração de minérios e aprovisionamento de equipamentos elétricos/ mecânicos;
2. Produção do chassi;
3. Produção da bateria e do motor elétrico;
4. Produção dos componentes do veículo;
5. Aprovisionamento de material para stock;
6. Construção de infraestrutura de carregamento.

De referir que as emissões da produção de energia nesta dissertação serão nulas uma vez que se irá apenas utilizar fontes de energia renovável.

Esta fase inclui, desta forma, a fronteira que se estende desde a extração de minérios, como o lítio e cobalto para a fabricação das baterias, até à construção de postos de carregamento de viaturas elétricas.

3.1.3. Fase de Uso

Nesta fase, realizou-se o inventário considerando todos os elementos associados ao uso/manutenção do veículo. Assim, foram definidos os seguintes elementos:

1. Manutenção/ Inspeções;
2. Postos de carregamento de viaturas elétricas;
3. Carregamentos dos veículos elétricos.

Na presente fase, tal como considerado na fase de extração, as emissões relacionadas com a produção de energia serão nulas uma vez que se irá apenas utilizar fontes de energia renovável.

3.1.4. Fase de Fim de Vida

Quanto à fase de fim de vida, deve ter-se em consideração os elementos que podem ser reciclados ou, por outro lado, os que terão de ser descartados. Desta forma, é realizada uma triagem onde se define que matérias/materiais poderão ser usadas de novo. Tal como realizado para as anteriores fases do ciclo de vida deste veículo o mesmo se sucede com a fase de fim de vida, definindo-se assim os seguintes elementos do inventário:

1. Deposição;
2. Triagem;
3. Reciclagem.

3.2. Veículos Elétricos a Pilha de Combustível

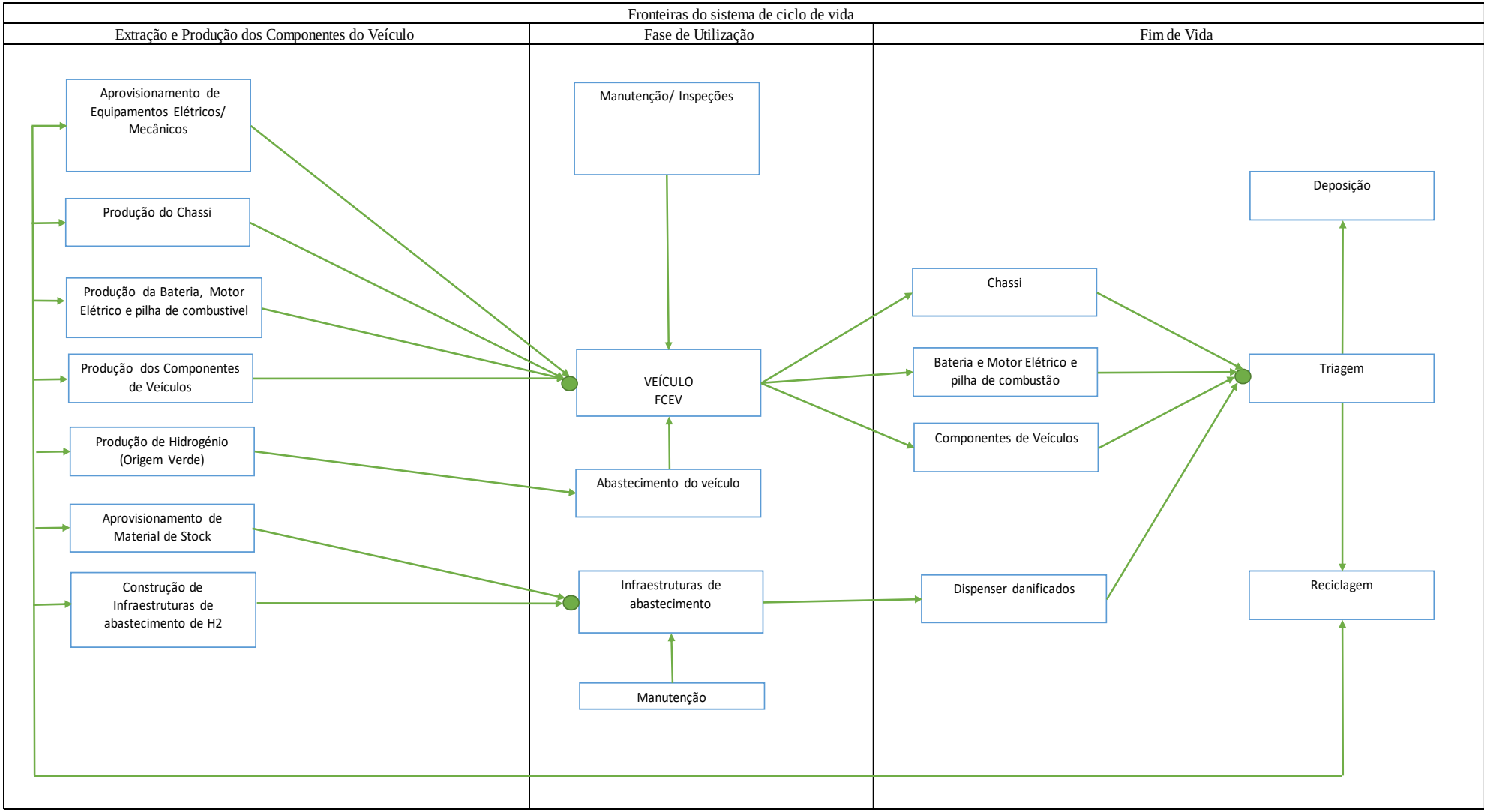
Tendo por base a ISO 14040, da mesma forma realizada no sistema de fronteira do BEV, definiram-se as seguintes fronteiras do sistema para os veículos elétricos a pilha de combustível:

1. Extração e Produção dos Componentes do Veículo;
2. Fase de Utilização;
3. Fim de Vida.

3.2.1. Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida

Depois de se realizarem as fases do ciclo de vida e os inventários das mesmas, podem-se então realizar as fronteiras do sistema do ciclo de vida, conforme se observa na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Fronteiras do Sistema de Ciclo de Vida do FCEV



3.2.2. Extração e Produção dos Componentes do Veículo

Tal como referido, no capítulo 3.1.1, na fase de extração e produção dos componentes do veículo são tidos em conta diversos elementos obtidos pelo inventário do ciclo de vida desta fase, sendo eles os seguintes:

1. Aprovisionamento de Equipamentos Elétricos/ Mecânicos;
2. Produção do Chassi;
3. Produção da Bateria, Motor Elétrico e Pilha de Combustível;
4. Produção dos Componentes do Veículo;
5. Produção de Hidrogénio;
6. Aprovisionamento de Material para Stock.

Tal como já referido, para a produção de hidrogénio apenas será considerada energia verde, ou seja, energia de fonte renovável. Desta forma, para a produção do mesmo as emissões são nulas.

3.2.3. Fase de Uso

Realizou-se o inventário considerando todos os elementos associados ao uso/manutenção do veículo, tal como sucedido anteriormente no capítulo 3.1, tendo sido definidos os seguintes elementos:

1. Manutenção/ Inspeções;
2. Abastecimento do Veículo;
3. Manutenção.

3.2.4. Fase de Fim de Vida

Em relação à fase de fim de vida, tal como sucedido no sistema de ciclo de vida do BEV, deve ter-se em consideração os elementos que podem ser reciclados ou, por outro lado, terão de ser descartados. Desta forma, é feita uma triagem onde se define que matérias/materiais poderão ser usadas de novo.

Tal como realizado para as anteriores fases do ciclo de vida deste veículo, o mesmo se sucede com a fase de fim de vida. Assim sendo, são definidos os seguintes elementos do inventário:

1. Deposição;
2. Triagem;
3. Reciclagem.

3.3. GREET.NET ®

Este programa, também designado por *Greenhouse, Regulated Emissions and Energy use in Transportation* (*GREET*) foi criado pelo *Argonne National Laboratory* em 1996 com a principal função de permitir realizar estudos acerca dos ciclos de vida dos veículos de transporte, conforme se pode observar na figura 3.1 [7].

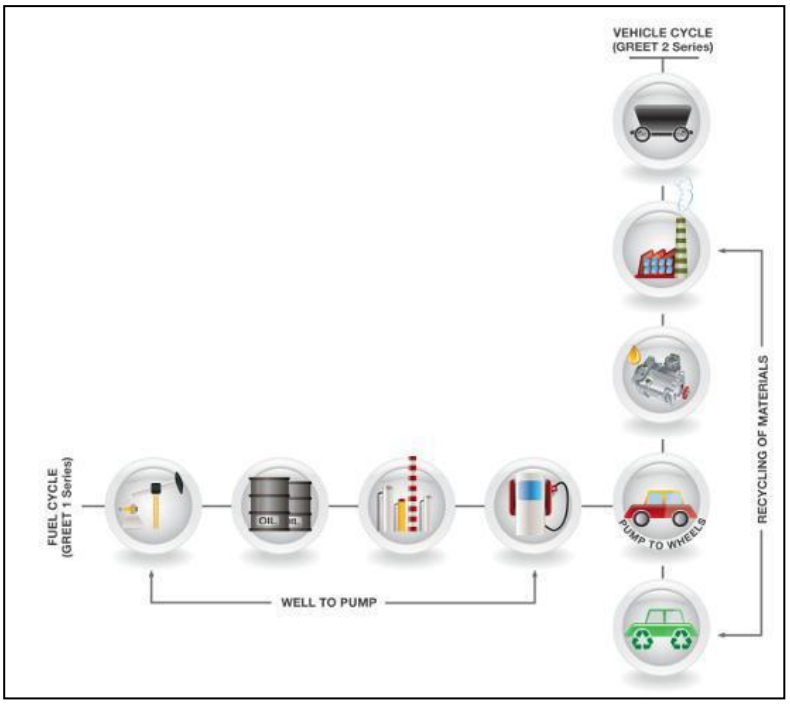


Figura 3.1 – Programa GREET ® [7]

Este programa permite a análise dos ciclos de vida do combustível e a sua utilização, bem como a análise do ciclo de vida do veículo que se pretende analisar. O *GREET* ® irá permitir obter dados acerca dos seguintes elementos:

1. Consumo de energia total e fontes de produção de energia;
2. Emissões dos GEE.

Como já referido, este programa permite analisar os ciclos de vida dos veículos, assim como as fontes de energia que se pretendem utilizar. Desta forma, é possível selecionar um sistema de energia já existente na base de dados do programa bem como as suas características, ou criar um sistema energético personalizado, consoante as

necessidades do utilizador. Pode-se, igualmente, definir o sistema energético considerando apenas energias de fontes renováveis ou definir um sistema "*mix*" entre fontes renováveis e não renováveis.

Desta forma no separador "*WTP Results – Electricity*" é possível criar/modificar o sistema energético que se pretende utilizar para a simulação, uma vez que este programa tem na sua base de dados diversos sistemas energéticos definidos, tanto no que diz respeito às zonas geográficas assim como as composições destes.

No caso desta dissertação para a simulação das emissões do FCEV e do BEV, definiu-se um sistema energético apenas constituído por energias renováveis criando assim o mix energético "Portugal 2022". Conforme se pode observar pela figura 3.2, é possível definir as fontes de produção de energia, bem como a sua percentagem no sistema energético que se pretende.

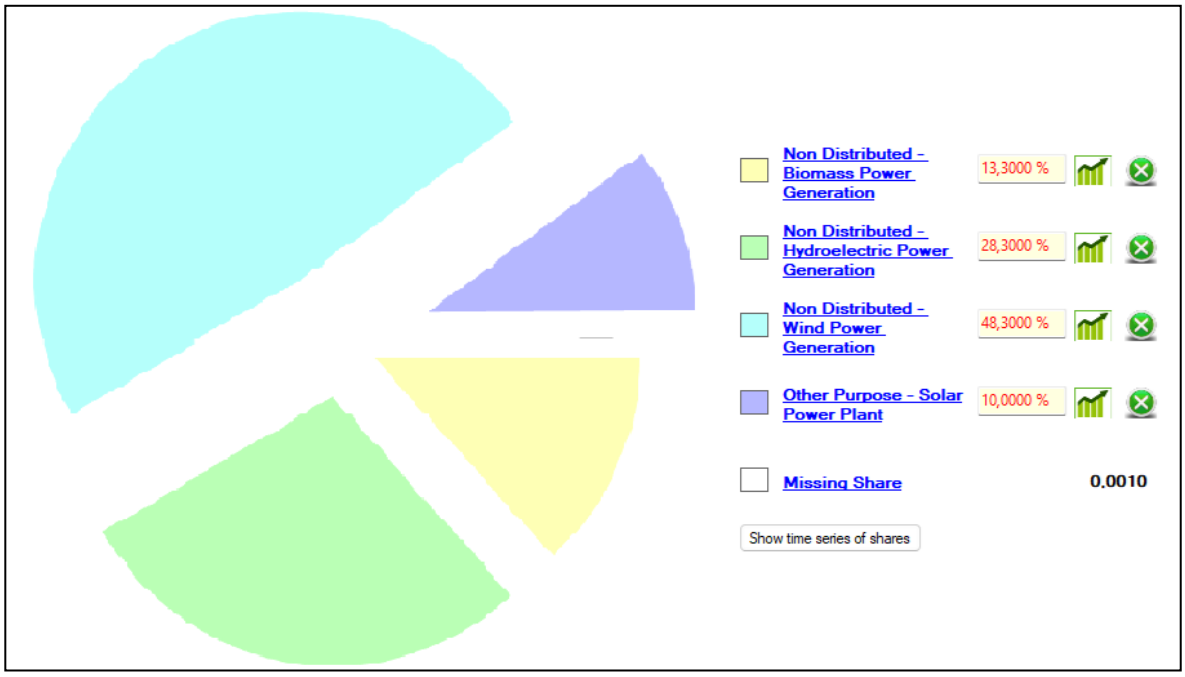


Figura 3.2 – Definição do sistema energético (Adaptado)

Da mesma forma, é possível criar/modificar o veículo que se deseja. No separador "WTW and *Cradle to Grave* (C2G) *Results*" é possível selecionar o veículo que se pretende ou definir-se um novo veículo. Desta forma criou-se para esta dissertação o veículo "*Tesla_Model_3*" e o veículo "*Toyota_Mirai*" utilizando por base veículos com tecnologia semelhante a ambos, alterando as suas características conforme os dados dos fabricantes destes modelos, tais como: quilómetros úteis de vida, número máximo de

passageiros, peso bruto do veículo e autonomia, fluídos e lubrificantes dos mesmos.

No caso do BEV, modificou-se um veículo da tecnologia BEV existente na base do GREET, alterando os quilómetros, o número de passageiros e a autonomia do veículo expresso em quilómetros, relativos à definição do ciclo de vida, criando assim o modelo "Tesla_Model_3. Para além disso é possível modificar as características dos principais componentes do veículo tais com a bateria e componentes elétricos/mecânicos no separador "*Vehicle Construction - Drag and Drop ADR Below*" como pode se observar pela figura 3.3.

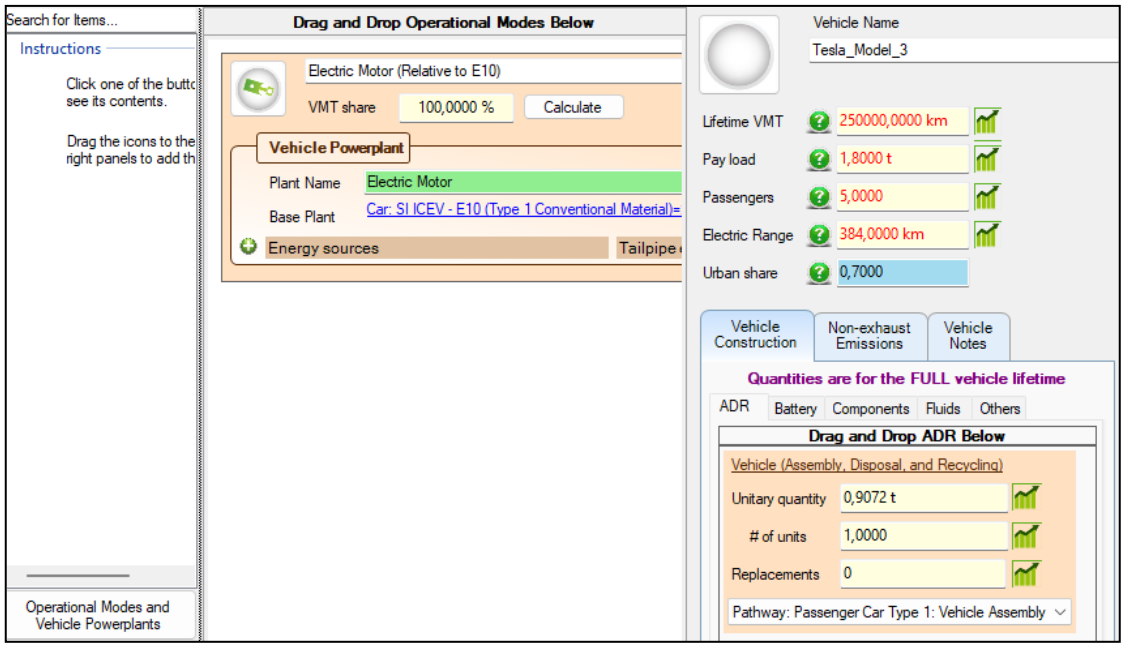


Figura 3.3 – Veículo "Tesla_Model_3"

Da mesma forma, modificou-se um veículo da tecnologia FCEV existente na base do GREET criando assim o modelo "Toyota_Mirai". Tal como se sucedeu no veículo da tecnologia BEV, alterou-se a definição do ciclo de vida em termo de quilómetros, o número de passageiros e a autonomia em quilómetros do veículo. Para além disso é possível modificar as características dos principais componentes do veículo, tais com a bateria e componentes elétricos/mecânicos no separador "*Vehicle Construction - Drag and Drop ADR Below*" como se pode conforme se pode verificar pela figura 3.4.

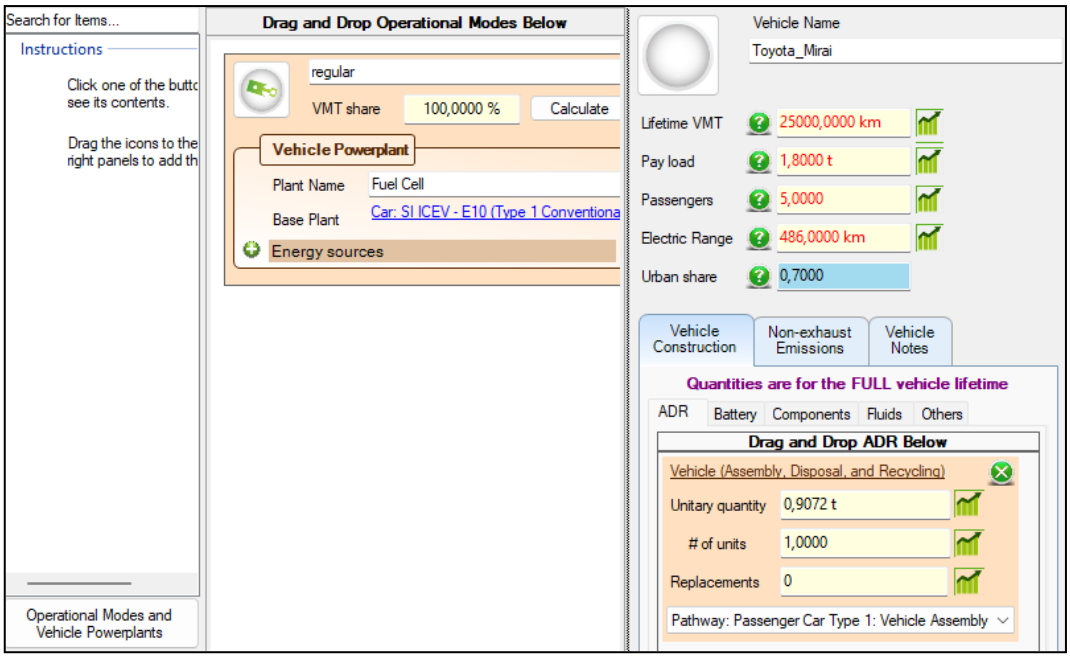


Figura 3.4 – Veículo “Toyota_Mirai”

Assim, com a constituição do sistema energético bem como com os veículos definidos, é possível, então, simular as emissões destes veículos em cada componente.

Para o estudo desta dissertação, considerou-se a unidade “/100 km”. Para que os resultados fossem expressos por quilometro percorrido, realizou-se a divisão dos valores obtidos por 100. Assim, os valores serão expressos nesta dissertação em “/km”.

A simulação deste *software*, permite retirar as emissões dos componentes principais destes veículos expressas em diversas unidades. Pode-se observar os resultados por unidade de emissões de dióxido de carbono, CO_2 ou por unidade de emissões de outros GEE. No que diz respeito a esta dissertação foram tidos em consideração os resultados obtidos expressos em “GHG -100” associado ao GWP a 100 anos. Os valores obtidos são expressos em “$kgCO_{2e}$/km”.

Capítulo 4 – Análise e Discussão de Resultados

Neste capítulo irão ser discutidos e analisados os resultados obtidos no programa *GREET.NET*®. Desta forma, pretende-se analisar os dados obtidos em termos de emissões de GEE dos veículos ao longo dos seus ciclos de vida. São analisadas as emissões obtidas em cada fase de vida destes, desde fase de produção que englobam as emissões na fase de exploração de matérias-primas assim como a produção do veículo em si. A fase de uso, onde estes veículos são designados como veículos que não emitem emissões de GEE, e a fase de fim de vida.

Estas simulações foram realizadas tendo como base de sistema energético o sistema criado com os dados de produção de energia produzida em Portugal em 2022, considerando apenas a produção energética através de fontes renováveis, simulando assim um cenário futuro de um mix energético 100% renovável.

4.1. Dados Utilizados para a Simulação

Tendo em conta que apenas se pretende utilizar energias renováveis do "mix" do sistema energético de Portugal, foi criado um sistema energético português com base nos dados da Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) onde, de janeiro a julho de 2022, foi produzida cerca de 24 664 GWh de energia em Portugal continental sendo que [27]:

- **Fonte Solar**: Foi produzido cerca de 1.553GWh, representando cerca de 6,30%;
- **Fonte Biomassa**: Foi produzido cerca de 2.022GWh, representando cerca de 8,20%;
- **Fonte Hídrica:** Foi produzido cerca de 4.143GWh, representando cerca de 16,80%;
- **Fonte Eólica:** Foi produzido cerca de 7.226GWh, representando cerca de 29,30%.

No total, estes valores correspondem a cerca de 60,60% da energia total produzida em Portugal, ou seja, mais de metade da energia produzida neste período teve origem "verde" sendo que a maior percentagem está refletida na fonte eólica representando 30%, conforme se pode observar na figura 4.1 [27].

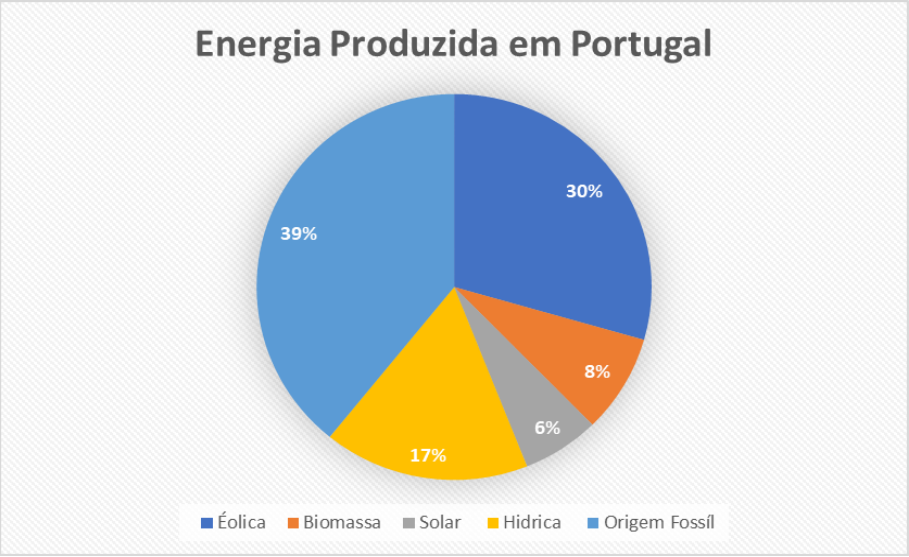


Figura 4.1 – Energia Produzida em Portugal [27]

Tendo em conta os elementos acima descritos desenvolveu-se o sistema designado por "Produção – Portugal 2022" em que se realizou uma estipulação aos valores de produção de energia através de fontes renováveis em Portugal no ano de 2022, desta forma obteve-se os seguintes valores:

- **Fonte Solar**: 10,00%;
- **Fonte Biomassa**: 13,33%;
- **Fonte Hídrica:** 28,33%;
- **Fonte Eólica:** 48,33%.

Consequentemente, tendo em conta o sistema energético definido, definiram-se os restantes parâmetros dos veículos. De acrescentar que ambos os veículos para efeitos desta simulação têm um tempo útil de vida de 250.000 km, de modo que os dados sejam obtidos de forma igual para ambos os veículos.

4.2. Características dos Veículos

Como já referido nesta dissertação foram selecionados, para efeitos de estudo e comparação, o veículo *Tesla® Model 3* (representante dos veículos a baterias) e o *Toyota® Mirai* (representante dos veículos a pilha de combustível).

Assim irá ter-se em conta os seguintes parâmetros para ambos os veículos:

1. Massa do Veículo;
2. Tipo de Bateria;
3. Aceleração, 0-100 km/h;
4. Máxima Velocidade;
5. Autonomia;
6. Consumo de energia por 100 km;
7. Líquidos e lubrificantes;
8. Pneus.

Para além destes parâmetros irá considerar-se que cada veículo tem em média 250.000 km de vida útil [28], como já referido.

4.2.1. Tesla® Model 3

No caso do *Model 3*, conforme se pode observar na tabela 4.1, os elementos que serão considerados de forma a ser possível a comparação entre estes dois veículos são os seguintes [23]:

Tabela 4.1 – Caraterísticas gerais do *Tesla® Model 3*

	Massa do Veículo	Tipo da Bateria	0-100 km/h Aceleração	Máxima velocidade	Autonomia	Consumo de energia por 100 km
Valores	1611 kg	Ni-MH	5 seg	210 km/h	354 km	14 kWh

4.2.2. Toyota® Mirai

No caso do *Mirai*, conforme se pode observar na tabela 4.2, os elementos que serão considerados de forma a ser possível a comparação entre estes dois veículos são os seguintes [29]:

Tabela 4.2 – Caraterísticas gerais do *Toyota® Mirai*

	Massa do Veículo	Tipo da Bateria	Tipo da Célula de Combustível	0-100 km/h Aceleração	Máxima velocidade	Autonomia	Consumo de H_2 por 100 km
Valores	1850 kg	Ni-MH	PEM	9,6 seg	175 km/h	486 km	0,85 kg

4.3. Análise dos Resultados

4.3.1. Emissões de Gases de Efeito de Estufa – Tesla® Model 3

Como já referido nesta dissertação, o ciclo de vida dos veículos é constituído pela fase de produção, uso e fase de fim de vida.

Os valores obtidos de GEE têm em conta o GWP a 100 anos. Assim, usando o cenário do sistema de energia que se definiu para efeitos de simulação foi possível para o *Tesla® Model 3* os resultados descritos na tabela 4.1.

Tabela 4.3 – Emissões de GEE do Ciclo de Vida do *Tesla® Model 3*

Fase de Produção	0,027 $kgCO_2e/km$
Fase de Uso	0 $kgCO_2e/km$
Fase de Fim de Vida	0,003 $kgCO_2e/km$

Conforme se pode observar pela tabela 4.3, as maiores emissões de GEE encontram-se na fase da produção do veículo, onde estão representadas cerca de 91% das emissões de GEE, cerca de 0,027 $kgCO_2e/km$, produzidas no ciclo de vida do veículo. Da mesma forma, pode-se observar que a fase de fim de vida do veículo apenas representa 9%, cerca de 0,003 $kgCO_2e/km$ das emissões emitidas no ciclo de vida do mesmo, a mesma conclusão pode-se observar pela figura 4.2.

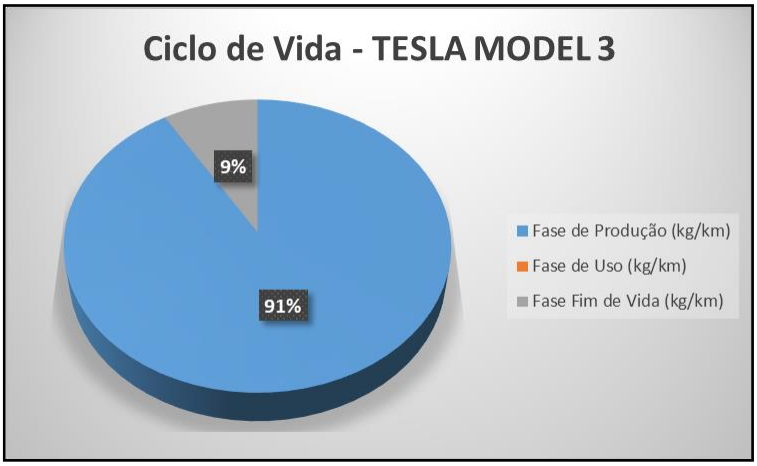


Figura 4.2 – Ciclo de Vida – *Tesla® Model 3*

A fase de uso apresenta uma percentagem de 0%, uma vez que apenas se considera o uso do veículo tendo em conta os quilómetros percorridos e os carregamentos realizados com energia de fonte renovável não considerando na simulação as emissões representadas pelos fluídos, tais como fluídos do circuito de refrigeração, óleos e fluídos do sistema de travagem.

Desta forma, no total pode-se concluir que no ciclo de vida do veículo *Tesla® Model 3* são emitidas cerca de 0,029 kgCO_2e/km.

Fazendo uma análise micro às emissões do ciclo de vida deste veículo, observou-se que a fase que mais emite GEE é a fase de produção onde se podem verificar os resultados observados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Emissões de GEE na Fase de Produção do *Tesla® Model 3*

Dados	Emissões GEE kgCO2e/km	Emissões GEE em percentagem %
Sistema Propulsor	0,000453	2%
Sistema de Transmissão	0,000748	3%
Chassi	0,002672	10%
Sistema de Tração	0,000919	3%
Controladores Eletrónicos	0,000623	2%
Carroçaria	0,005307	20%
Pneus	0,001206	5%
Bateria	0,014655	55%
Fase de Produção	**0,027**	**100%**

Contemplando a tabela 4.4, verifica-se que a produção de bateria corresponde a cerca de 55% das emissões de GEE, aproximadamente 0,014655 $kgCO_2e/km$. Este valor tem em conta a exploração das matérias-primas, como o lítio, para a produção da bateria, que quanto maior for a sua capacidade maior serão as emissões desta. Consequentemente, a carroçaria surge em segundo lugar com uma percentagem igual a 20%, cerca de 0,000623 $kgCO_2e/km$. Ainda com uma percentagem relevante, pode observar-se que a produção do chassi do veículo representa cerca de 10% das emissões, aproximadamente 0,002672 $kgCO_2e/km$.

Com menores percentagens de emissões de GEE encontram-se os pneus com 5%, cerca de 0,001206 $kgCO_2e/km$ e com 3% de emissões o sistema de transmissão e o sistema de tração, com valores de 0,000748 $kgCO_2e/km$ e 0,000919 $kgCO_2e/km$, respetivamente.

Por fim, com 2%, pode se observar o sistema propulsor e os controladores eletrónicos com valores de cerca 0,000453 $kgCO_2e/km$ e 0,000623 $kgCO_2e/km$, respetivamente, como se pode observar pela figura 4.3.

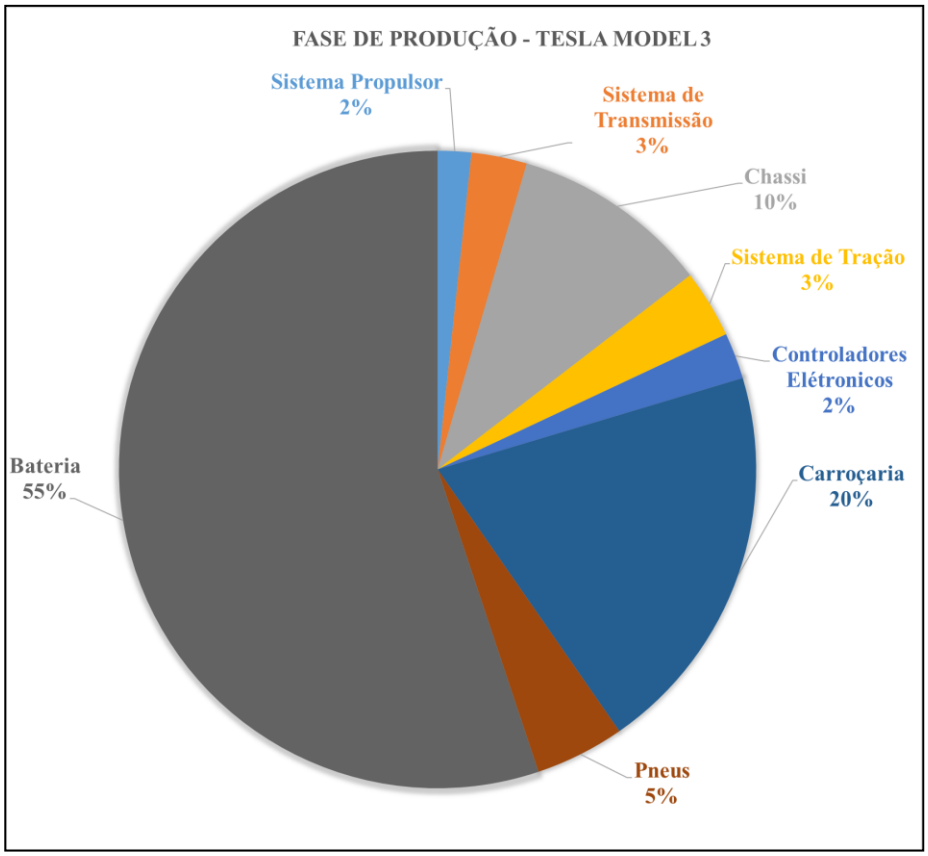


Figura 4.3 – Fase de Produção do *Tesla® Model 3*

4.3.2. Emissões de Gases de Efeito de Estufa – Toyota® Mirai

Da mesma simulação, obtiveram-se os dados de emissões de GEE para o *Toyota® Mirai*.

Os valores obtidos de GEE têm em conta GWP a 100 anos. Assim, da mesma forma, utilizando o cenário do sistema de energia que se definiu para esta simulação, para o *Toyota® Mirai*, obtiveram-se os dados descritos na tabela 4.3.

Tabela 4.5 - Emissões de GEE do Ciclo de Vida do *Toyota®* Mirai

Fase de Produção	0,016 $kgCO_2e/km$
Fase de Uso	0 $kgCO_2e/km$
Fase de Fim de Vida	0,001 $kgCO_2e/km$

Como se pode observar pela tabela 4.5, as maiores emissões de GEE, como já observado no *Model 3*, encontram-se na fase da produção do veículo, onde esta representa cerca de 92% das emissões de GEE, cerca de 0,016 $kgCO_2e/km$, produzidas no ciclo de vida do veículo, conclusão esta que se pode observar pela figura 4.4.

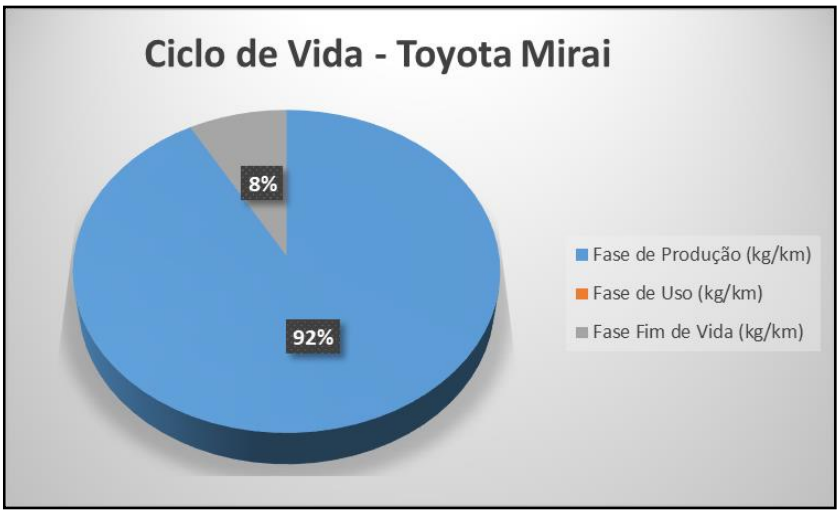


Figura 4.4 – Ciclo de Vida – *Toyota® Mirai*

Da mesma forma que no *Model 3*, a fase de uso apresenta uma percentagem de 0% uma vez que apenas se considera o uso do veículo tendo em conta os quilómetros percorridos e que a produção do H_2 para o abastecimento, é produzido através de energia de fonte renovável não considerando a simulação das emissões representadas pelos fluídos (descritos no subcapítulo anterior).

Pode-se, também, observar que a fase de fim de vida do veículo apenas representa 8%, cerca de 0,001 $kgCO_2e/km$ das emissões emitidas no ciclo de vida do mesmo.

Analisando os elementos em cima citados, pode-se então concluir que no total do ciclo de vida do veículo *Toyota® Mirai* são emitidas cerca de 0,017 $kgCO_2e/km$.

Ao realizar uma análise aprofundada às emissões do ciclo de vida deste veículo, tal como já realizada nos resultados obtidos no *Model 3*, verificou-se que a fase mais poluente é a fase de produção, podendo-se observar tais resultados na tabela 4.4.

Tabela 4.6 – Emissões de GEE na Fase de Produção do *Toyota® Mirai*

Dados	Emissões GEE ($kgCO_2e/km$)	Emissões GEE em percentagem %
Sistema Propulsor	0,001311	8%
Sistema de Transmissão	0,000416	3%
Chassi	0,002699	18%
Sistema de Tração	0,00046	3%
Controladores Eletrónicos	0,00043	3%
Célula de Combustível	0,002939	18%
Carroçaria	0,005511	34%
Pneus	0,001206	8%
Bateria	0,000838	5%
Fase de Produção	**0,016**	**100%**

Desta forma, contemplando tanto a tabela 4.6 como a figura 4.5, ao contrário do que acontece no *Model 3*, a bateria não representa a maior emissão de GEE, mas sim, a produção da carroçaria correspondendo a uma percentagem de 34%, cerca de 0,005511 $kgCO_2e/km$ total das emissões da fase de produção do veículo.

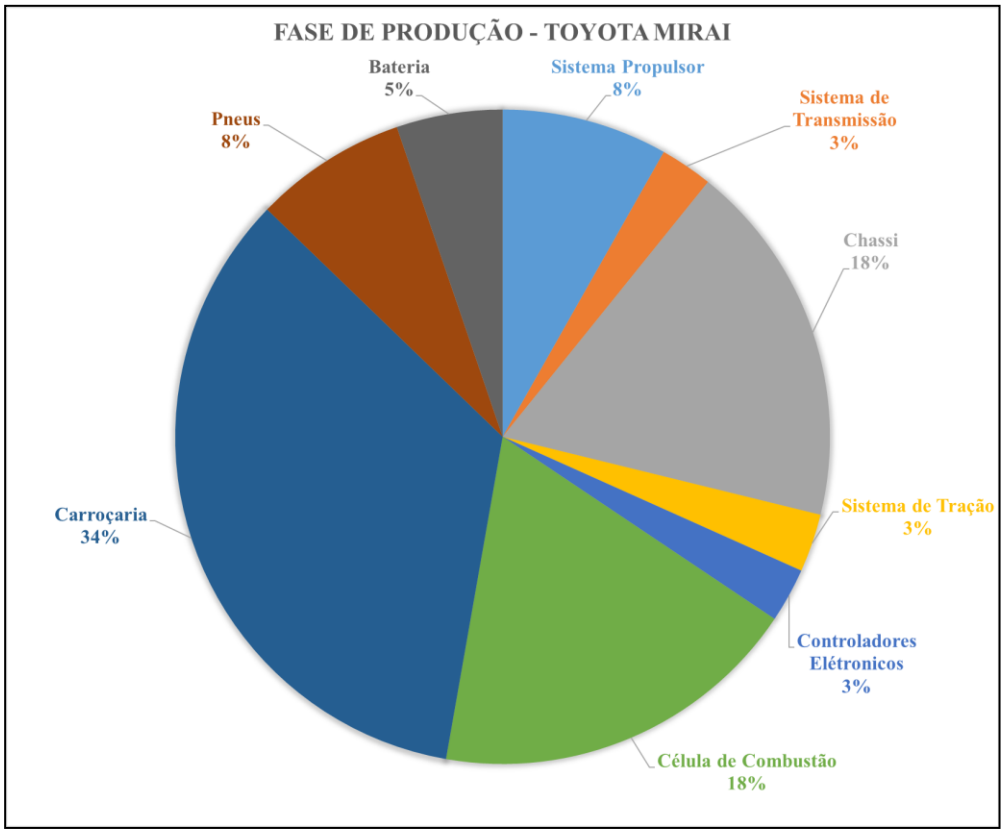


Figura 4.5 – Fase de Produção do Toyota® Mirai

Por sua vez, o segundo componente com maiores emissões de GEE trata-se da célula de combustível, com uma percentagem de 18%, cerca de 0,002939 $kgCO_2e/km$, da mesma forma que acontece com a bateria do BEV, a célula de combustível engloba as emissões de exploração de matérias-primas com a platina bem como a produção da própria célula. Com a mesma percentagem observa-se a produção do chassi do veículo que representa cerca de 18% das emissões, aproximadamente 0,002699 $kgCO_2e/km$.

Com a percentagem de 8% de emissões encontram-se a produção do sistema de propulsor e os pneus, com cerca de 0,001311 $kgCO_2e/km$ e 0,001206 $kgCO_2e/km$, respetivamente.

Ao contrário do que acontecia com o *Model 3*, as emissões de GEE resultantes da produção da bateria para este veículo, apenas representam cerca de 5% das emissões com valores de cerca de 0,000838 $kgCO_2e/km$.

Por fim, 3% das emissões encontram-se no sistema de transmissão, sistema de tração e controladores eletrónicos, valores de 0,000416 $kgCO_2e/km$, 0,00046 $kgCO_2e/km$ e 0,00043 $kgCO_2e/km$, respetivamente.

4.4. Discussão dos Resultados

Tendo em conta os elementos obtidos nos subcapítulos 4.1 e 4.2, é possível determinar qual o veículo mais poluente em termos de emissões de GEE tendo em conta os seus ciclos de vida, os inventários realizados e o sistema energético utilizado para a obtenção destas conclusões, conforme se pode observar pela tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Emissões de GEE do Ciclo de Vida: *Toyota® Mirai Vs Tesla® Model 3*

Emissões de GEE ($kgCO_2e/km$)		
Dados	*TESLA MODEL 3*	*TOYOTA MIRAI*
Fase de Produção	0,027	0,016
Fase de Uso	0	0
Fase Fim de Vida	0,003	0,001
Total	**0,029**	**0,017**

Ou seja, tal como é possível observar, o *Tesla® Model 3* é o veículo que apresenta maiores emissões de GEE, com valores de cerca de 0,029 $kgCO_2e/km$, onde a maior percentagem de emissões se encontra na fase de produção. Por outro lado, o *Toyota® Mirai* apenas emite cerca de 0,017 $kgCO_2e/km$ onde, como acontece com o *Tesla® Model 3*, a maior percentagem de emissões se encontra na fase de produção.

Porém, deve ter-se em conta que estes veículos, mesmo sendo bastante similares em termos de constituição, apresentam valores diferentes de emissões de GEE para os mesmos componentes na fase de produção como se pode observar pela tabela 4.7. e pela figura 4.6.

Tabela 4.7 – Emissões de GEE na Fase de Produção: *Toyota® Mirai Vs Tesla® Model 3*

Dados	*TESLA MODEL 3* (kgCO_2e/km)	*TOYOTA MIRAI* (kgCO_2e/km)
Sistema Propulsor	0,000453	0,001311
Sistema de Transmissão	0,000748	0,000416
Chassi	0,002672	0,002699
Sistema de Tração	0,000919	0,00046
Controladores Eletrónicos	0,000623	0,00043
Célula de Combustível	0	0,002939
Carroçaria	0,005307	0,005511
Pneus	0,001206	0,001206
Bateria	0,014655	0,000838
Fase de Produção	**0,027**	**0,016**

Comparando as fases de produção dos dois veículos, conforme já referido, é possível verificar algumas discrepâncias em termos de emissões de GEE em alguns componentes similares tendo em conta o global de emissões de cada veículo.

Ou seja, no caso da bateria, sabendo que ambos os veículos utilizam a mesma tecnologia de baterias, estas apresentam capacidades diferentes, ou seja, o *Tesla® Model 3* usado para esta simulação apresenta uma bateria de capacidade de 75 kWh, ao contrário do *Toyota® Mirai* que apenas apresenta uma bateria de capacidade de 1,24 kWh. Ou seja, a capacidade da bateria do *Model 3* é cerca de 60 vezes maior do que a capacidade da bateria do *Mirai* [30],[4].

Como já referido nesta dissertação, a bateria do *Mirai* apenas auxilia nos arranques e no caso da pilha de combustível não ter a capacidade, no momento, de fornecer energia ao motor elétrico [4].

Outro dado interessante que é possível retirar desta tabela é o facto da carroçaria do *Mirai* apresentar maiores emissões de GEE que a carroçaria do *Model 3*. A razão deste facto deve-se à implementação de sistemas de segurança no veículo a pilha de combustível, devido à volatilidade e densidade reduzida do hidrogénio. Desta forma são implementadas diversas soluções elétricas/mecânicas como válvulas de retenção de elevadas pressões, entre outras estruturas metálicas, tornando o veículo mais robusto. A implementação destes sistemas de segurança faz com que as emissões da carroçaria do

Mirai sejam responsáveis pela maior libertação de emissões de GEE, na fase de produção do mesmo e, comparativamente com o *Model 3*, estas emissões serem cerca de 1,03 superiores às emissões emitidas pela produção da carroçaria do *Model 3*.

No que diz respeito aos restantes componentes, pode-se observar que as emissões de GEE libertadas na fase de produção do chassi do *Mirai* no global das emissões da fase de produção do mesmo representam cerca de 18%, ao contrário do *Model 3*, onde o chassi no global das emissões libertadas na fase de produção apenas apresenta uma percentagem de 10%.

Outra diferença notável em termos de libertação de emissões de GEE na fase de produção de cada veículo é observada na produção do sistema propulsor em que no *Model 3* este apenas representa cerca de 2% do global das emissões libertadas na fase de produção deste veículo, ao contrário do *Mirai* em que este sistema corresponde a 8% no global das emissões emitidas na fase de produção deste veículo.

Por outro lado, no que diz respeito à substituição de pneus pode-se verificar que as percentagens têm pouca relevância, onde no caso do *Model 3* pode-se observar que esta representa apenas 5% no global das emissões da fase de produção e que no caso do *Mirai* este componente corresponde a 8% no global das emissões da fase de produção do mesmo.

Relativamente às infraestruturas tanto para a realização dos carregamentos dos BEV como para o abastecimento dos FCEV, as emissões provocadas por estas estão diluídas em todas as fases que constituem o ciclo de vida destes veículos.

Em suma, os valores obtidos encontram-se semelhantes aos valores observados nos artigos analisados nesta dissertação, conforme se pode observar pela tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Dados recolhidos nos artigos analisados

Estudo	Mix Energético	Ano/Previsão	Tipo de Veículo	Capacidade da Bateria (kWh)	Resultados (kgCO2e/km)
[15]	Califórnia - Norte	2019	FCEV	1,24	0,105
	Califórnia - Sul				0,149
[16]	Reino Unido - 100% Gás Natural	2019	FCEV	1,24	0,142
	Dinamarca - 100% Energia Eólica				0,024
[22]	Polónia	2050	BEV	100	0,172
	República Checa				0,146
	Canadá				0,110
[23]	China	2019	BEV	75	0,376
[25]	Europa - 100 % Energias Renováveis (Cenário especulativo)	N.d	BEV	75	0,010

Pela análise da tabela, pode-se observar que se apenas são consideradas energias renováveis para o ciclo de vida dos veículos dos BEV e dos FCEV os valores obtidos nesta dissertação apresentam semelhanças com os resultados obtidos nos diferentes artigos.

Pelo artigo [16], pode-se observar que no caso do mix energético dinamarquês, apenas considerado para efeitos de simulação, a energia era de 100% de origem eólica o valor obtido para as emissões de GEE do FCEV era de 0,024 $kgCO_2e/km$ que comparando com o valor obtido na presente dissertação para o mesmo veículo, 0,017 $kgCO_2e/km$. Verifica-se que o valor obtido na simulação desta dissertação vai ao encontro do esperado, apresentando um desvio de cerca de 0,007 $kgCO_2e/km$.

Da mesma forma, pelo artigo [25], pode-se observar que ao realizar simulações das emissões de GEE e dos BEV, tendo por base a mesma metodologia utilizada nesta dissertação, no que se refere em se recorrer a um mix energético 100% constituído por fontes renováveis. Este artigo admite que as emissões de GEE do BEV poderão chegar até 0,010 $kgCO_2e/km$, o que comparando com o valor obtido nesta dissertação, 0,029 $kgCO_2e/km$, verifica-se um desvio de cerca de 0,019 $kgCO_2e/km$.

Por fim, se comparamos os resultados obtidos com o artigo [26], e tendo em conta o que já foi mencionado nesta dissertação pode-se observar uma tendência linear no que diz respeito ao aumento das emissões de GEE com o aumento da capacidade de bateria. Tendo em conta que nesta dissertação se considera a mesma base temporal na simulação realizada no ciclo de vida deste veículo e que a bateria tem a mesma tecnologia, observa-se a mesma tendência linear esperada, conforme se pode observar pela figura 4.6.

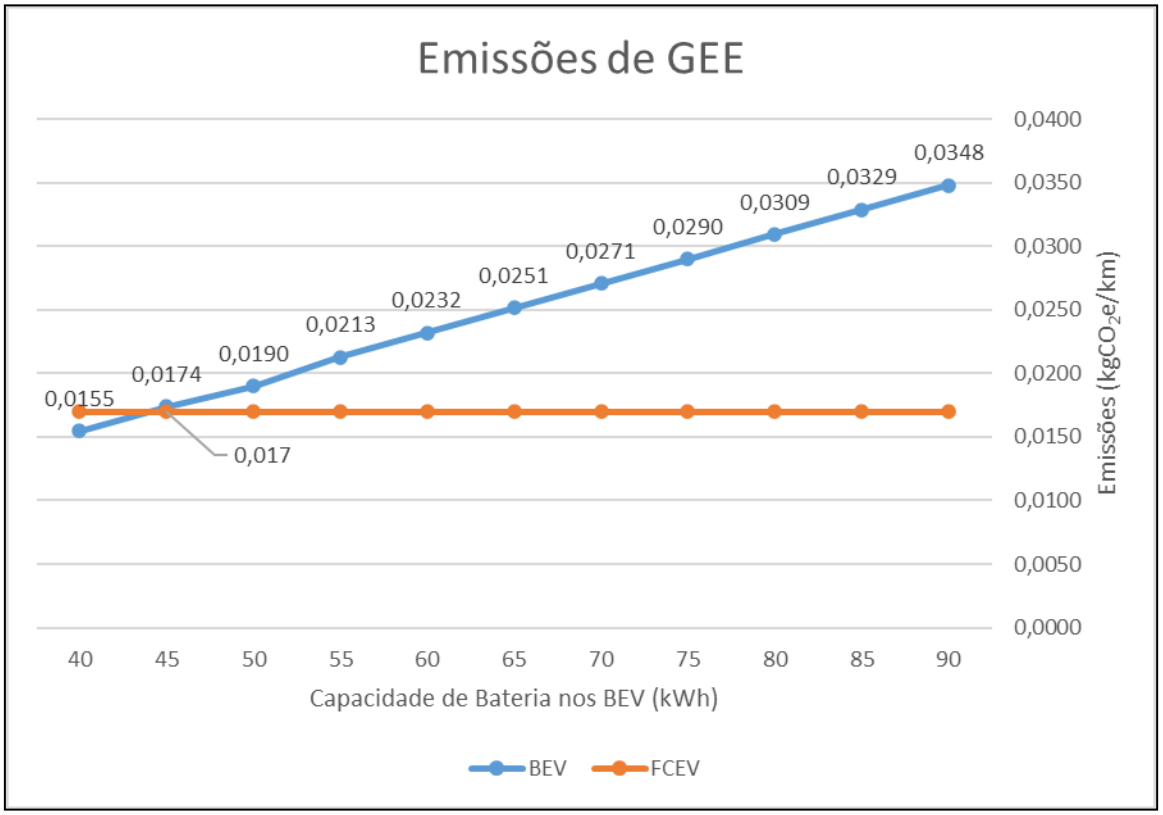


Figura 4.6 – Emissões de GEE para as diferentes capacidades de baterias

Da mesma forma e analisando os dados obtidos no mesmo artigo [26], em que se define que os BEV passam a emitir mais GEE do que os FCEV com baterias de capacidade superiores a 50 kWh. Os valores obtidos nesta dissertação divergem ligeiramente do esperado, uma vez que o ponto de viragem ocorre com baterias de capacidade superiores a 45 kWh. Pelo facto, para efeitos de simulação nesta dissertação considerou-se que o mix energético era 100 % de fontes renováveis ao contrário do que acontece com o estudo do artigo [26] em que o mix energético é constituído por elevada percentagem de energia provida de fontes renováveis, bem como por fontes não renováveis.

Em suma, pode-se concluir que os dados obtidos nesta dissertação vão ao encontro do que era esperado tendo em conta as influências dos mix energéticos nas emissões de GEE no ciclo de vida destes veículos, tanto no caso dos BEV como no caso dos FCEV.

Capítulo 5 – Conclusão e Trabalhos Futuros

Atualmente, o tema das alterações climáticas trata-se de um assunto de extrema preocupação. Todos os dias surgem notícias de acontecimentos catastróficos como cheias, secas severas, tempestades, entres outros.

Desta forma, e de modo a atrasar tais acontecimentos, a Humanidade viu a necessidade de atingir a neutralidade carbónica onde a mobilidade tem um grande papel neste tema.

No presente, a mobilidade como hoje é conhecida, constituída na sua maioria por veículos a motores térmicos (diesel, gasolina, a gás natural ou gás de petróleo liquefeito (GPL)), começa a sentir a necessidade de novas formas de se adaptar aos dias de hoje. Neste sentido, a mudança para a mobilidade elétrica tem em vista as metas estabelecidas pela União Europeia, como é o caso da meta para atingir a neutralidade carbónica até 2050.

Contudo, mesmo sabendo que a mobilidade elétrica apresenta emissões de GEE inferiores aos veículos a motores térmicos, e tendo em conta os mix energéticos de cada país, sentiu-se a necessidade de estudar as emissões que estes veículos poderão emitir. Deve considerar-se, também, o facto de os mix de energias dos países desenvolvidos enfrentarem, atualmente, o paradigma das energias chamadas “verdes”, de fontes renováveis.

Assim, o principal objetivo deste estudo foi estudar qual a tecnologia que apresenta menores emissões de GEE, dentro da mobilidade elétrica e tendo em conta que futuramente se pretende que o mix energético de todos os países seja 100% de origem em fontes renováveis.

Ou seja, dentro da mobilidade elétrica foram escolhidos dois tipos de veículos, o veículo elétrico a bateria (BEV) e o veículo elétrico a pilha de combustível (FCEV).

Com base no ciclo de vida de cada veículo definiram-se as fronteiras de cada ciclo de vida realizando assim, para cada um, o seu inventário. Posteriormente, foi possível recolher todas as informações necessárias para a realização da simulação dos ciclos de vida de ambos os veículos.

Com o auxílio das simulações realizadas foi possível obter os dados relativamente às emissões de cada fase do ciclo de vida de cada veículo, desde a fase de produção do próprio veículo passando pela fase de uso do veículo até à fase de fim de vida.

Assim, tendo em conta o atual cenário energético em Portugal, em que apenas se consideraram as percentagens de energia produzida através de fontes renováveis, chegou-se à conclusão de que os FCEV no global do seu ciclo de vida, serão menos poluentes no que diz respeito à emissão de GEE, comparativamente às emissões do ciclo de vida dos BEV, uma vez que os FCEV, com este cenário, emitem cerca de 0,017 $kgCO_2e/km$ e os BEV emitem cerca de 0,029 $kgCO_2e/km$.

No caso do BEV, verifica-se que na fase de produção deste veículo a produção de bateria corresponde a cerca de 55% das emissões de GEE, de seguida a carroçaria com cerca de 20% e com 10% das emissões o chassi. Com menor relevância para emissões de GEE verificam-se os pneus com cerca de 5% e com a percentagem de 3% encontra-se o sistema de tração e transmissão. O sistema propulsor assim como os controladores elétricos apenas representam cerca de 2% do total das emissões deste veículo.

No caso do FCEV, verifica-se que na fase de produção deste veículo a produção a célula de combustível, bem como o chassi, correspondem a cerca de 18% das emissões de GEE.

Com menor relevância para emissões de GEE apresenta-se o sistema propulsor e os pneus com cerca de 8%. Ao contrário do que acontecia com o BEV, as emissões de GEE resultantes da produção da bateria para este veículo, apenas representam cerca de 5%. Por fim, com 3% das emissões encontram-se o sistema de transmissão, sistema de tração e os controladores eletrónicos.

Ao comparar estes valores com a meta da União Europeia em que define que os veículos novos ligeiros de passageiros não deverão emitir a partir de 2030 mais do que

0,05940kgCO_2e/km poderemos então concluir que os veículos em estudo estão a cumprir a meta estabelecida, uma vez que o resultado do FCEV com o cenário energético idealizado para esta simulação apresenta emissões de cerca de 0,017 kgCO_2e/km enquanto, o BEV apresenta emissões de cerca de 0,029 kgCO_2e/km.

Por fim, para trabalhos futuros possivelmente deverão ser estudados veículos com capacidades superiores a 75 kWh no caso dos BEV. No presente estudo considerou-se um veículo com capacidade de bateria superior a 50 kWh, que apenas permite autonomias que vão até ao máximo de 300 km, o que num futuro próximo apenas será utilizado como veículo para percursos mais comerciais ou citadinos. Outros estudos interessantes poderão incluir veículos com tecnologias novas de baterias que eventualmente surgirão no mercado, uma vez que, como se pode observar, a bateria representa quase 55% das emissões de GEE na fase de produção destes veículos.

Bibliografia

[1] G. Oliveira e N. Correia, «Modelos de energia e emissões para o ciclo de vida dos materiais das tecnologias automóveis Engenharia do Ambiente Júri», 2012.

[2] APA, «Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050», *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*, vol. 2050, pp. 9–24, 2019.

[3] Telesis, «Peças de carro de marcação permanente | Telesis Technologies, Inc.» https://telesis.com/pt/what-parts-get-permanently-marked-in-an-electrical-car/ (acedido 19 de Julho de 2022).

[4] Toyota, «Outline of the Mirai Key Specifications», *Toyota Mot. Corp.*, n. November, p. 13, 2014, [Em linha]. Disponível em: http://newsroom.toyota.co.jp/en/download/4224903

[5] Instituto Português da Qualidade, «Norma Portuguesa NP EN ISO 14044 2010». Portugal, 2010.

[6] A. Hariprasad, I. Priyanka, R. Sandeep, V. Ravi, e O. Shekar, «Battery Management System in Electric Vehicle», *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 9, n. 05, pp. 605–607, 2021, doi: 10.1109/ICNTE51185.2021.9487762.

[7] Argonne National Laboratory, «GREET® Model The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model», 2021. https://greet.es.anl.gov/ (acedido 17 de Setembro de 2022).

[8] U.S. Department of Energy, «Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work?», *How Do All-Electric Cars Work*. https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work (acedido 19 de Julho de 2022).

[9] T. Denton, *Electric and hybrid vehicles*. New York: Routledge, 2016. doi: 10.1002/9781118954454.ch7.

[10] J. Yuan, L. Dorn-Gomba, A. D. Callegaro, J. Reimers, e A. Emadi, «A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 51501–51518, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069448.

[11] P. Nogueira, «Veículos Elétricos Tendência indústria de automóveis Revolução

está aqui», *Veículos Elétricos Tendência indústria de automóveis Revolução está aqui*, 2018. https://clickpetroleoegas.com.br/veiculos-eletricos-fabricacao-funcionamento-e-vantagens/ (acedido 20 de Julho de 2022).

[12] ECRIM, «DC-DC Conversores De Tecnologia Para Elétrico / Híbrido Veículos Elétricos», *DC-DC Conversores De Tecnologia Para Elétrico / Híbrido Veículos Elétricos*, 2022. https://pt.ecrimpower.com/dc-dc-converters-technologies-for-electric-hybrid-electric-vehicles_n142 (acedido 20 de Julho de 2022).

[13] P. das E. Renovaveis, :: «Portal das Energias Renováveis »:, *Tecnologias: Fuel Cells*, 2022. http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=28&ID_area=6&ID_sub_area=18 (acedido 20 de Julho de 2022).

[14] G. M. de F. Nunes, «Caracterização de pilha de combustível de hidrogénio e monitorização de célula ndividual», Instituto Superior Tecnico - Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

[15] P. Sinha e B. Brophy, «Life cycle assessment of renewable hydrogen for fuel cell passenger vehicles in California», *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 45, n. January, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101188.

[16] E. Y. C. Wong, D. C. K. Ho, S. So, C. W. Tsang, e E. M. H. Chan, «Life cycle assessment of electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles using the greet model—a comparative study», *Sustain.*, vol. 13, n. 9, 2021, doi: 10.3390/su13094872.

[17] European Environment Agency, «Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives: TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report», Luxembourg, 2018. [Em linha]. Disponível em: https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle

[18] T. Santos, «Estudo de um Sistema de Armazenamento de Hidrogénio para Veículos», Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2018.

[19] I. Evtimov, R. Ivanov, H. Stanchev, G. Kadikyanov, e G. Staneva, «Life cycle assessment of fuel cells electric vehicles», *Transp. Probl.*, vol. 15, n. 3, pp. 153–166, 2020, doi: 10.21307/TP-2020-041.

[20] I. Blagojević e S. Mitić, «Hydrogen As a Vehicle Fuel», *Mobil. Veh. Mech.*, vol. 44, n. 2, pp. 37–49, 2018, doi: 10.24874/mvm.2018.44.02.04.

[21] A. M. Férriz, A. Bernad, M. Mori, e S. Fiorot, «End-of-life of fuel cell and hydrogen products: A state of the art», *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 12872–12879, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.176.

[22] M. Shafique e X. Luo, «Environmental life cycle assessment of battery electric vehicles from the current and future energy mix perspective», *J. Environ. Manage.*, vol. 303, n. October 2021, p. 114050, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114050.

[23] G. Gui, «Carbon Footprint Study of Tesla Model 3», *E3S Web Conf.*, vol. 136, pp. 0–3, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201913601009.

[24] «China in 2019: What was the energy system like? - Energy BrainBlog». https://blog.energybrainpool.com/en/china-in-2019-what-was-the-energy-system-like/ (acedido 10 de Outubro de 2022).

[25] A. Hoekstra, «The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions», *Joule*, vol. 3, n. 6, pp. 1412–1414, 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.06.002.

[26] A. Sternberg e C. Hank, «BATTERY ELECTRIC AND FUEL CELL ELECTRIC VEHICLES WITH RANGES OVER 300 KILOMETERS Study commissioned by H2 Mobility», n. July, 2019.

[27] Associação Portuguesa de Energias Renováveis, «Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental em 2022», 2022. https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao (acedido 17 de Setembro de 2022).

[28] R. Ma e Y. Deng, «The electrochemical model coupled parameterized life cycle assessment for the optimized design of EV battery pack», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 27, n. 2, pp. 267–280, 2022, doi: 10.1007/s11367-022-02026-z.

[29] Y. Chen, X. Hu, e J. Liu, «Life cycle assessment of fuel cell vehicles considering the detailed vehicle components: Comparison and scenario analysis in China based on different hydrogen production schemes», *Energies*, vol. 14, n. 15, pp. 7–10, 2019, doi: 10.3390/en12153031.

[30] EVcompare.Io, «Tesla Model 3 Standard Range specs, price, photos, offers and incentives». https://evcompare.io/cars/tesla/tesla_model_3_standard_rwd/ (acedido 17 de Setembro de 2022).