



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Eduardo dos Santos Pereira

Análise à conversão de um veículo citadino
tradicional para a propulsão elétrica com
extensor de autonomia

Junho, 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Eduardo dos Santos Pereira

Análise à conversão de um veículo citadino
tradicional para a propulsão elétrica com
extensor de autonomia

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Martins
Professor Doutor Francisco Brito

Junho, 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado apenas se tornou possível graças ao contributo e incentivo inesgotável de várias pessoas que contribuíram, sem dúvida, não só para o meu enriquecimento académico, mas também para o meu crescimento a nível pessoal.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Luís Martins e Professor Doutor Francisco Brito por, desde a primeira reunião que tivemos, me terem auxiliado na realização desta dissertação, sendo incansáveis no esclarecimento de dúvidas, com uma paciência excepcional em reunir e indicar quais os caminhos a seguir para alcançar os objetivos em cada fase da realização do projeto.

Um agradecimento ao Professor Doutor Francisco Brito por ter partilhado o ficheiro Excel que se revelou determinante na realização da componente prática, e ajudado a perceber a organização do mesmo, além de sugerir parâmetros de avaliação que foram aplicados nas simulações, sem esquecer a ajuda na instalação e compreensão do funcionamento do AVL Cruise.

Gostaria igualmente de agradecer ao Professor Doutor Luís Martins pelas inúmeras sugestões e ficheiros fornecidos que se revelaram essenciais no desenvolvimento da dissertação.

Agradeço também à colega Carolina Clasen pela disponibilidade em esclarecer as dúvidas que surgiram e por ter ajudado na interação com a equipa de suporte do AVL.

Quero também agradecer à AVL, pelas licenças cedidas ao DEM/MEtRICs no âmbito do University Partnership Program, bem como à equipa de suporte que foi sempre muito prestável nas várias questões que foram sendo colocadas e que foram também parte importante para que este projeto pudesse ser concluído.

Por último, e principalmente, gostaria de agradecer aos meus pais, à minha irmã, ao meu cunhado, a toda a restante família e aos meus amigos mais próximos, por terem sido peças fundamentais nesta longa caminhada que agora termina.

A todos vós, o meu mais sincero muito obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

As sucessivas restrições à circulação de veículos com motores de combustão interna têm tornado o desenvolvimento de motores Diesel e gasolina cada vez mais difícil e caro, tendo já levado ao progressivo e generalizado interesse das marcas pela mobilidade elétrica. Os veículos elétricos, comparativamente aos veículos convencionais, permitem reduzir as emissões poluentes e de gases com efeito de estufa no seu uso, recorrendo a fontes de energia renovável, evitando o uso de combustíveis fósseis, que não são renováveis. No entanto, a maioria dos veículos elétricos comercializados até ao presente são da classe média-alta com custos, pesos e potências demasiado elevadas para as necessidades da circulação urbana.

O objetivo principal do trabalho foi analisar a viabilidade técnica e económica da conversão de um pequeno veículo citadino existente (e.g. tipo Citroën C1) para um veículo de tração elétrica, com uma autonomia de 100 km, 100 km/h de velocidade máxima e um consumo inferior a 10 kWh/100 km. Foi feita também a análise da viabilidade de montar um pequeno motor térmico (cerca de 125 cc, 4T) acoplado a um gerador elétrico como extensor de autonomia (*range extender*). O veículo seria apenas para circulação urbana e suburbana (estradas nacionais). Para a autonomia em modo elétrico de 100 km seriam suficientes baterias com capacidade até 10 kWh. Com as baterias descarregadas, o *range extender* deveria ser suficiente para manter o veículo em circulação suburbana a uma velocidade média de 50 km/h. Todos os componentes utilizados na sua conversão deverão ser de produção em série e com preço relativamente baixo. O trabalho começou pelo dimensionamento dos principais componentes (motor elétrico, baterias, motor de combustão, gerador, controlador, etc), de modo que o veículo consiga cumprir um circuito citadino real e um circuito por estrada, em andamento semelhante a um veículo normal. Para isso foi utilizado um *software*, desenvolvido em Excel, que contabiliza todos os fluxos energéticos relevantes (e.g. energias motora, de atrito, travagem, etc), durante o funcionamento de um veículo, seguindo um qualquer percurso real ou um ciclo normalizado. Foi também utilizado o *software* AVL Suite, habitualmente usado pelos construtores de veículos e que inclui o módulo *Boost* (motores de combustão) e *Cruise* (simulação de ciclos de condução).

Os resultados indicam que, para um veículo de uma tonelada, será suficiente um motor elétrico com 10 kW de potência contínua e 30 kW de pico. Para os ciclos WLTC foi possível obter consumos de 8 kWh/100 km em modo elétrico e cerca de 3 L/100 km em modo "só gasolina", o que ultrapassou os objetivos pretendidos. No entanto a viabilidade económica será difícil, sobretudo face à inexistência no mercado de *range extenders* de pequena dimensão e potência.

PALAVRAS-CHAVE

AVL Cruise; Ciclos WLTC; Excel; *Range Extender*; Veículos elétricos.

ABSTRACT

Successive restrictions on the circulation of vehicles with internal combustion engines have made the development of Diesel and petrol engines increasingly difficult and expensive, having already led to the progressive and widespread interest of brands in electric mobility. Electric vehicles, compared to conventional vehicles, allow reducing pollutant emissions and greenhouse gases in their use, using renewable energy sources, avoiding the use of fossil fuels, which are not renewable. However, most electric vehicles sold to date are of the upper-middle class with costs, weights and powers that are too high for the needs of urban traffic.

The main objective of the work was to analyze the technical and economic feasibility of converting an existing small city vehicle (e.g. Citroën C1 type) to an electric traction vehicle, with a range in electric mode of 100 km, 100 km/h maximum speed and fuel consumption less than 10 kWh/100 km. An analysis was made of the feasibility of assembling a small thermal engine (about 125 cc, 4T) coupled to an electric generator as a range extender. The vehicle would only be used for urban and suburban traffic (national roads). For autonomy in electric mode of 100 km would be enough batteries with a capacity of up to 10 kWh. With the batteries discharged, the range extender should be enough to keep the vehicle in suburban traffic at an average speed of 50 km/h. All the components used in its conversion must be of series production and with a relatively low price. The work started with the dimensioning of the main components (electric motor, batteries, combustion engine, generator, controller, etc.) so that the vehicle can complete a real city circuit and a road circuit, in a similar way to a normal vehicle. For this, a software, developed in Excel, was used, which accounts for all relevant energy flows (e.g. motor, friction, braking energies, etc.), during the operation of a reference vehicle (without defined traction system) following a any real path or a normalized cycle. The AVL Suite software, commonly used by vehicle manufacturers, was also used, which includes the Boost module (combustion engines) and Cruise (driving cycle simulation).

The results indicate that, for a one-ton vehicle, an electric motor with 10 kW of continuous power and 30 kW of peak power will be sufficient. For the WLTC cycles, it was possible to obtain consumptions of 8 kWh/100 km in electric mode and about 3 L/100 km in "petrol only" mode, which exceeded the intended objectives. However, economic viability will be difficult, especially given the lack of small and powerful range extenders in the market.

KEYWORDS

AVL Cruise; Electric vehicles; Excel; Range extender; WLTC Cycles.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Índice.....	viii
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xxi
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xxvi
Lista de Símbolos.....	xxix
1. Introdução.....	32
1.1 Enquadramento.....	32
1.2 Objetivos.....	34
1.3 Organização da dissertação.....	34
2. Estado da Arte.....	36
2.1 Veículos elétricos.....	36
2.1.1. Veículos Elétricos a Bateria (BEV).....	39
2.1.2. Veículos Híbridos Elétricos Simples (HEV).....	39
2.1.3. Veículos Híbridos Elétricos <i>Plug-in</i> (PHEV).....	40
2.1.4. Veículos Elétricos <i>Mild Hybrid</i> (MHEV).....	41
2.1.5. Veículos a Células de Combustível (FCEV).....	42
2.1.6. Veículos elétricos com <i>range extender</i>	42
2.2 Motores elétricos.....	49
2.2.1. Motor de corrente contínua com escovas (CC).....	49
2.2.2. Motor <i>Brushless</i> DC (BLDC).....	52
2.2.3. Motor de indução (IM).....	53
2.2.4. Motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM).....	57
2.2.5. Motor CA de relutância comutada (SRM).....	59
2.2.6. Comparação das tecnologias de motores para veículos elétricos.....	61
2.3 Geradores.....	63
2.4 Controladores.....	65

2.5 Baterias	67
3. Fundamentos teóricos	74
3.1 Modelação do desempenho do veículo.....	74
3.2 Força de tração.....	74
3.2.1. Força de resistência ao rolamento.....	75
3.2.2. Força de arrasto aerodinâmico.....	76
3.2.3. Força de escalada.....	77
3.2.4. Força de aceleração.....	77
3.2.5. Força total de tração	79
3.3 Aceleração do veículo.....	79
3.4 Dimensionamento da bateria.....	80
3.5 Estimativa de consumo e autonomia	82
4. Desenvolvimento	84
4.1 Seleção do veículo.....	84
4.2 Seleção dos componentes.....	85
5. Modelos computacionais	89
5.1 Modelo Excel.....	89
5.1.1. Descrição do modelo	92
5.2 <i>Software</i> comercial AVL Cruise	95
5.2.1. Modelação do veículo.....	95
6. Simulações computacionais e análise de resultados.....	97
6.1 Modelo Excel.....	97
6.1.1. Capacidade total da bateria	98
6.1.2. Potência máxima da bateria.....	106
6.1.3. Tempo mínimo de funcionamento do range extender	117
6.1.4. Estado de carga inicial da bateria (SoC)	128
6.1.5. Massa do veículo	135
6.2 AVL Cruise	144
6.2.1. Capacidade total da bateria.....	146

6.2.2. Estado de carga inicial da bateria (SoC).....	147
6.2.3. Massa do veículo	148
6.3 Comparação de resultados	150
7. Análise dos custos	152
8. Conclusões e Trabalhos futuros	159
8.1 Conclusões	159
8.2 Sugestões de trabalhos futuros.....	161
Referências Bibliográficas	162
Anexo A – Configurações dos veículos híbridos	176
A1. Híbrido Série (elétrico com extensor de autonomia).....	176
A2. Híbrido Paralelo.....	177
A3. Híbrido Série-Paralelo	179
A4. Comparação entre as diferentes configurações	179
Anexo B – Motores utilizados nos range extender	181
B1. Motor de combustão interna convencional	181
B2. Motor rotativo Wankel.....	182
B3. Motores de pistão-livre.....	183
B4. Microturbina.....	184
B5. Células de combustível.....	186
Anexo C – Motores de relutância comutada (SRM)	187
C1. Motor de relutância comutada linear.....	187
C2. Motor de relutância comutada de fluxo axial	187
C3. Motor de relutância comutada de fluxo radial	187
Anexo D – Motor na roda (<i>In-wheel Motor</i>)	188
Anexo E – Tipos de geradores existentes.....	190
E1. Geradores síncronos.....	190
E1.1 Vantagens e desvantagens	191
E1.2 Aplicações [88]	191
E2. Geradores síncronos de ímanes permanentes	191
E2.1 Vantagens e desvantagens	193

E2.2 Aplicações [90] [91].....	193
E3. Geradores de corrente contínua.....	194
E3.1 Vantagens e desvantagens	197
E3.2 Aplicações [92]	198
E4. Geradores de indução.....	198
E4.1 Vantagens e desvantagens	199
E4.2 Aplicações [101]	199
Anexo F – Sistemas de armazenamento de energia.....	201
F1. Sistema de Recuperação da Energia Cinética (KERS)	201
F2. Sistema hidráulico (HRB).....	202
Anexo G – Carregadores para Veículos Elétricos.....	203
G1. Carregadores rápidos	204
G2. Conectores	207
Anexo H – Características do Citroën C1.....	209
Anexo I– Características do <i>kit</i> selecionado	212
Anexo J– Dados técnicos do gerador.....	213
Anexo K – Dados técnicos do motor Honda GX 270	214
Anexo L – Condições de simulação do modelo Citroën C1 no ciclo de condução WLTC.....	215
Anexo M – Módulos usados nas simulações do AVL Cruise	219
M1. Módulo <i>Vehicle</i>	219
M2. Módulo <i>Battery</i>	219
M3. Módulo <i>Electric Machine</i>	222
M3.1 Módulo referente ao motor elétrico	222
M3.2 Módulo referente ao gerador	224
M4. Módulo <i>Engine</i>	227
M5. Módulo <i>Wheel</i>	229
M6. Módulo <i>Brake</i>	234
M7. Módulo <i>Differential</i>	235
M8. Módulo <i>Single Ratio Transmission</i>	236
M9. Módulo <i>Cockpit</i> do AVL Cruise	237

M10. Módulo <i>Online Monitor</i>	238
M11. Controlador <i>On-board</i>	239
Anexo N – Simulação computacional em Excel	245
N1. Capacidade total da bateria	245
N2. Potência máxima da bateria	246
N3. Tempo mínimo de funcionamento do <i>range extender</i>	249
N4. Estado de carga da bateria (SoC)	251
N5. Massa do veículo	253
Anexo O – Simulação computacional no AVL Cruise	256
O1. Capacidade total da bateria	256
O2. Estado de carga da bateria (SoC)	262
O3. Massa do veículo	273
Anexo P – Custos da conversão do veículo.....	289
Anexo Q – Valor amortizado até ao ano de 2030.....	290

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura típica da rede de automóveis modernos, com várias unidades de controlo do motor ligadas a diferentes barramentos (adaptado de [6]).	36
Figura 2 – Arquiteturas do sistema de acionamento dos VE'S: a) com embraiagem, caixa de velocidades e diferencial; b) com motor elétrico, caixa de velocidades com apenas uma velocidade e diferencial; c) com motor, embraiagem fixa e diferencial como unidade única; d) com dois motores elétricos acoplados a duas rodas separadas através da engrenagem fixa; e) com motor <i>in-wheel</i> junto com engrenagem fixa; f) com motor <i>in-wheel</i> /sem engrenagem (adaptado de [9]).	37
Figura 3 – Configuração típica do BEV (arquitetura em série) [11].	39
Figura 4 – Configuração paralelo-série presente no Toyota Prius HEV [11].	40
Figura 5 – Configuração – base dos das várias arquiteturas dos veículos elétricos híbridos [12].	40
Figura 6 – Configuração do Toyota Prius PHEV [11].	41
Figura 7 – Configuração típica do FCV [11].	42
Figura 8 – <i>Range extender</i> da AVL (adaptado de [16]).	44
Figura 9 – <i>Range Extender</i> da FEV, com rotor Wankel apresentado no Congresso Mundial de 2009 da SAE [16].	44
Figura 10 – Vista geral do <i>range extender</i> desenvolvido pela Kolbenschmidt Pierburg – FEV [16].	45
Figura 11 – <i>Range extender</i> da Lotus & Fagor com motor em linha naturalmente aspirado [16].	45
Figura 12 – <i>Range Extender</i> da Mahle [16].	46
Figura 13 – a) microturbina da Bladon Jets [17]; b) microturbina da Capstone (adaptado de [18]).	46
Figura 14 – Classificação dos 4 tipos de Range Extender em relação a várias características (Preço, <i>Time-to-market</i> , Eficiência, Emissões, Manutenção, Ruído e Vibrações) [16].	48
Figura 15 – Estrutura de um veículo elétrico com <i>range extender</i> [16].	49
Figura 16 – Motor de corrente contínua com escovas [22].	50
Figura 17 – Enrolamentos e polos de compensação de um motor CC excitado separadamente (adaptado de [20]).	50
Figura 18 – Visão geral dos três diferentes tipos de motores CC (adaptado de [20]).	51
Figura 19 – Motor <i>Brushless DC</i> [24].	52
Figura 20 – Motor de indução com estator e rotor [20].	53
Figura 21 – Estrutura de um motor de indução de polo sombreado (adaptado de [29]).	54
Figura 22 – Estrutura de um motor de indução em gaiola de esquilo (adaptado de [30]).	54
Figura 23 – Secção transversal do motor de indução monofásico [32].	55

Figura 24 – Princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico (adaptado de [33]).	56
Figura 25 – Secção transversal: a) motor síncrono permanente montado à superfície não saliente (PMSM/SMPMSM), b) motor de íman permanente saliente interior (IPMSM) (adaptado de [20]).	57
Figura 26 – Secção transversal de um motor síncrono saliente excitado externamente [20].	58
Figura 27 – Motores de ímanes permanentes: a) de fluxo radial, b) de fluxo axial, c) de fluxo transversal [2].	58
Figura 28 – Motor SRM de 3 fases, 2 pares de polos e proporção 8:6 [20].	60
Figura 29 – Curva velocidade-binário dos motores elétricos: a) motor CC (adaptado de [37]); b) motor <i>Brushless</i> DC (adaptado de [38]); c) motor de indução (adaptado de [39]); d) motor PMSM (adaptado de [40]); e) motor SRM (adaptado de [19]); f) curva ideal (adaptado de [41]).	62
Figura 30 – Gerador usado em automóveis [43].	63
Figura 31 – Peças internas do gerador (adaptado de [43]).	64
Figura 32 – Esquema do funcionamento do controlo de um veículo elétrico [2].	65
Figura 33 – Diagrama de blocos típico de uma ECU (adaptado de [44]).	66
Figura 34 – Diagrama de blocos do controlo do motor em malha fechada [2].	66
Figura 35 – Exemplos de controlados: a) Evolveit, b) Zilla, c) Evnetics [2].	67
Figura 36 – Célula eletroquímica [11].	68
Figura 37 – Bateria de Chumbo-Ácido [46].	70
Figura 38 – Bateria de Níquel-Cádmio [47].	71
Figura 39 – Bateria de Níquel-Hidreto Metálico [48].	71
Figura 40 – Bateria de íões de lítio [49].	72
Figura 41 – Esquema das forças que atuam num veículo numa subida [52].	75
Figura 42 – Área frontal do Citroën C1 (adaptado de [61]).	76
Figura 43 – Esquema da tração de um automóvel [2].	77
Figura 44 – Rendimentos no fluxo de energia (regeneração a traço interrompido) [2].	83
Figura 45 – 2ª geração do Citroën C1 (versão europeia de 2020) [55].	84
Figura 46 – a) Motor elétrico, b) Controlador do motor, c) Caixa de velocidades, d) Eixo de transmissão, e) Conversor de potência CC – CC, f) Carregador, g) Pack de baterias de lítio [57].	86
Figura 47 – Gerador síncrono trifásico de CA adotado para o modelo a incorporar nas simulações [58].	87
Figura 48 – Motor Honda GX 270 [60].	88
Figura 49 – Fator de utilidade (UF) usado na Alemanha em função da autonomia totalmente elétrica	

[65].....	92
Figura 50 – Modelo de veículo elétrico com range extender em AVL CRUISE.	96
Figura 51 – Parâmetros de potência e estado de carga para a capacidade total da bateria de 7,5 kWh, 10 kWh, 12,5 kWh e 15 kWh e: a) modo CD, com 80% de carga inicial, sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial, para o ciclo WLTC estendido (25 km).	101
Figura 52 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes à potência máxima de bateria de 15 kW e 30 kW, para uma capacidade total da bateria de 15 kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).	107
Figura 53 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes à potência máxima de bateria de 7,5 kW, 15 kW, 22,5 kW e 30 kW, para uma capacidade total da bateria de 7,5 kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).	110
Figura 54 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do range extender para uma capacidade total da bateria de 15 kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).	119
Figura 55 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do range extender para uma capacidade total da bateria de 7,5kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).	121
Figura 56 – Estado de carga correspondentes aos vários SoC, para uma bateria de 15 kWh: a) 100% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).	129
Figura 57 – Estado de carga correspondentes aos vários SoC, para uma bateria de 7,5 kWh: a) 100% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).	130
Figura 58 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes às várias massas do veículo, para uma capacidade total da bateria de 15 kWh: a) 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).	136
Figura 59 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes às várias massas do veículo, para uma capacidade total da bateria de 7,5 kWh: a) 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e	

b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).....	137
Figura 60 – Perfil, em função do tempo, do ciclo WLTC para veículos da classe 3a.	145
Figura 61 – Preço médio da gasolina simples 95 praticado em Portugal em dezembro de 2021 [72].	153
Figura 62 – Configuração de um híbrido série (elétrico com extensão de autonomia) [12].	176
Figura 63 – Configuração de um híbrido paralelo [12].....	178
Figura 64 – Configuração de um híbrido série-paralelo [12].....	179
Figura 65 – Princípio de funcionamento dos extensores de autonomia com motor de combustão interna (adaptado de [75]).....	181
Figura 66 – Representação dos 4 tempos do motor de ignição comandada (adaptado de [16]).	182
Figura 67 – Motor Wankel [77].	183
Figura 68 – Princípio de funcionamento dos motores de pistão-livre [78].....	183
Figura 69 – a) Esquema de microturbina de veio único; b) Esquema de microturbina de veio duplo [16].	185
Figura 70 – Capstone CMT-380 [80].	186
Figura 71 – Projeto BREEZE incorporado no Fiat 500 (adaptado de [81]).	186
Figura 72 – Estrutura dos motores de relutância comutada lineares (LSRM) (adaptado de [36]).	187
Figura 73 – Estrutura de um motor de relutância comutada de fluxo axial (adaptado de [36]).	187
Figura 74 – Configuração do sistema do motor na roda (adaptado de [80]).	188
Figura 75 – Motor na roda desenvolvido pela Protean [82].	189
Figura 76 – Gerador síncrono (adaptado de [86]).	190
Figura 77 – Construção de um gerador síncrono (adaptado de [85]).	190
Figura 78 – Gerador síncrono de ímanes permanentes (adaptado de [90]).	192
Figura 79 – Princípio de funcionamento do gerador síncrono de ímanes permanentes (adaptado de [90]).	193
Figura 80 – Posição 0° (Plano CC neutro) [94].	195
Figura 81 – Posição 90° (Plano CC) [94].	196
Figura 82 – Posição 180° (Plano CC) [94].	196
Figura 83 – Posição 270° (Plano CC) [94].	197
Figura 84 – Posição 0° (Plano CC neutro) [94].	197
Figura 85 – Motor de indução a trabalhar como gerador (adaptado de [98]).	199
Figura 86 – a) sistema <i>KERS</i> desenvolvido pela Flybrid, b) corte da transmissão toroidal da Xtrac,	

c) volante de inércia (adaptado de [103] [104]).	201
Figura 87 – Sistema HRB desenvolvido pela Bosch Rexroth (adaptado por [106]).	202
Figura 88 – a) Bateria do Mercedes S400 <i>BlueHybrid</i> [107], b) Bateria do Toyota Prius (adaptado de [108]).	203
Figura 89 – Esquema genérico da transferência de potência unidirecional e bidirecional [11].	204
Figura 90 – Magnum Cap MCR63 [109].	205
Figura 91 – Efacec QC45 [111].	206
Figura 92 – Possíveis configurações do Terra 53 (da esquerda para a direita): Terra 53 C, Terra 53 CJ,	207
Figura 93 – Sistema de carga por indução da Delphi (adaptado de [114]).	207
Figura 94 – Sistemas de ligação a veículos elétricos, e respetivas normas, protocolos (CHAdeMO) ou alianças (Legrand, SCAME e Schneider) [116][117][118][119][120][121][122].	208
Figura 95 – Janela da aba Vehicle do módulo do veículo.	219
Figura 96 – Curva do OCV – SoC de uma bateria típica de iões de lítio [125].	220
Figura 97 – Janela da aba Battery H.	221
Figura 98 – Janela da aba Idle Voltage com a representação da tensão durante a: a) carga; b) descarga.	221
Figura 99 – Curva de teste do motor elétrico do kit selecionado [57].	222
Figura 100 – Janela da aba Electric Machine do módulo do motor elétrico.	223
Figura 101 – Janela dos mapas característicos do motor elétrico relativos à: a) potência mecânica máxima; b) eficiência.....	224
Figura 102 – Curva do teste de performance do gerador relativa à: a) potência; b) tensão [121].	225
Figura 103 – Janela da aba Electric Machine do módulo do gerador.	226
Figura 104 – Janela dos mapas característicos do gerador relativos à: a) potência mecânica máxima; b) eficiência.....	226
Figura 105 – Janela da aba Engine do módulo do motor térmico.	228
Figura 106 – Janela da aba Full Load Characteristic do módulo do motor térmico.	228
Figura 107 – Curva de performance do motor Honda GX 270 [132].	228
Figura 108 – Janela da aba Motoring Curve do módulo do motor térmico.	229
Figura 109 – Janela da aba Engine Maps Basic do módulo do motor térmico.	229
Figura 110 – Caixa de propriedades da roda.....	231
Figura 111 – Janela da aba Wheel do módulo da roda.	232

Figura 112 – Janela da aba Rolling Radius do módulo da roda.....	234
Figura 113 – Janela da aba Brake do módulo do travão dianteiro (à esquerda) e traseiro (à direita). 235	
Figura 114 – Janela da aba Differential do módulo do diferencial.	236
Figura 115 – Janela da aba Single Ratio Transmission do módulo da transmissão.	237
Figura 116 – Janela da aba Cockpit do módulo do cockpit.	237
Figura 117 – Janela da aba Acceleration Pedal Characteristic do módulo do cockpit.	238
Figura 118 – Janela da aba Brake Pedal Characteristic do módulo do cockpit.	238
Figura 119 – Janela da aba Description of Data Bus do módulo Online Monitor.....	239
Figura 120 – Janela da aba Constants do módulo Constants.	239
Figura 121 – Janela da aba PID Control do módulo PID.	240
Figura 122 – Código C dos travões.	241
Figura 123 – Janela da aba Description of Data Bus do módulo Function, relativo aos travões.....	242
Figura 124 – Código C da unidade de controlo do cockpit.	242
Figura 125 – Janela da aba Description of Data Bus do módulo Function, relativo ao cockpit.....	243
Figura 126 – Código C do range extender.	243
Figura 127 – Janela da aba Description of Data Bus do módulo Function, relativo ao cockpit.....	244
Figura 128 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO ₂ nos vários ciclos WLTC nos modos CD e CS relativos à capacidade total da bateria para um SoC: a) 80%, b) 20%.	246
Figura 129 – Coluna referente a potência insuficiente do motor elétrico sem erro (à esquerda), com erro, dado a energia de propulsão ser superior à potência máxima do motor elétrico (ao centro); potência do motor elétrico necessária para cumprir o ciclo, com indicação do valor máximo necessário (à direita).	247
Figura 130 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO ₂ nos vários ciclos WLTC para 80% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.	248
Figura 131 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO ₂ nos vários ciclos WLTC para 20% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.	249
Figura 132 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO ₂ nos vários ciclos WLTC correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do range extender para 80% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.....	250
Figura 133 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO ₂ nos vários ciclos WLTC correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do range extender para 20% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.....	251

Figura 134 – Variação dos consumos nos vários ciclos WLTC correspondentes ao estado de carga (SoC) relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 12,5 kWh, c) 10 kWh e d) 7,5 kWh.	253
Figura 135 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO ₂ nos vários ciclos WLTC correspondentes à massa do veículo para 80% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.....	254
Figura 136 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO ₂ nos vários ciclos WLTC correspondentes à massa do veículo para 20% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.....	255
Figura 137 – Parâmetros de entrada da variável capacidade total da bateria.	256
Figura 138 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC, para 1 000 kg de peso, nas várias capacidades da bateria para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	257
Figura 140 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	258
Figura 140 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para 7,5 kWh de capacidade da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	259
Figura 141 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	260
Figura 142 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	260
Figura 143 – Variação do binário, potência e rotação do motor para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	261
Figura 144 – Variação do consumo elétrico e de combustível para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	262
Figura 145 – Parâmetros de entrada da variável estado de carga da bateria (SoC).	262
Figura 146 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC nas várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.	264
Figura 147 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.	267
Figura 148 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.	269
Figura 149 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.	270

Figura 150 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.....	271
Figura 151 – Variação do binário, potência e rotação do motor para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.	272
Figura 152 – Variação do consumo elétrico e de combustível para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.	273
Figura 153 – Parâmetros de entrada da variável massa do veículo.....	273
Figura 154 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	274
Figura 155 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	275
Figura 156 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	277
Figura 157 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	278
Figura 158 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	279
Figura 159 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	279
Figura 160 – Variação do binário, rotação e potência mecânica máximo para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	281
Figura 161 – Variação do binário, rotação e potência mecânica máximo para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	282
Figura 162 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	283
Figura 163 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	284
Figura 164 – Variação do binário, potência e rotação do motor para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	285
Figura 165 – Variação do binário, potência e rotação do motor para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.....	286

Figura 166 – Variação do consumo elétrico e de combustível para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh..... 287

Figura 167 – Variação do consumo elétrico e de combustível para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh..... 287

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre vários *range extenders* disponíveis no mercado (adaptado de [14]). 47

Tabela 2 – Avaliação das tecnologias de motores elétricos (adaptado de [9]). 61

Tabela 3 – Modelos de BEV e respetivos motores elétricos (adaptado de [9]). 63

Tabela 4 – Desempenho técnico das diferentes tecnologias de baterias utilizadas nos veículos elétricos [11]. 73

Tabela 5 – Características do veículo considerado [55]. 84

Tabela 6 – Características dos componentes do kit considerado [57]. 86

Tabela 7 – Características do gerador considerado [59]. 87

Tabela 8 – Características do motor considerado [61]. 88

Tabela 9 – Características do ciclo WLTC de classe 1, 2 e 3 [62]. 90

Tabela 10 – Parâmetros do ciclo WLTC classes 3a e 3b [65]. 91

Tabela 11 – Parâmetros de entrada do modelo Excel. 92

Tabela 12 – Parâmetros apresentados nos resultados. 97

Tabela 13 – Parâmetros de entrada das simulações das várias capacidades da bateria, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de 100%, 80%; 50% e 20% e capacidade da bateria de 7,5 kWh, 10 kWh, 12,5 kWh e 15 kWh..... 98

Tabela 14 – Parâmetros de saída das simulações das várias capacidades da bateria, nos modos CD e CS, capacidade total da bateria de 7,5 kWh, 10 kWh, 12,5 kWh e 15 kWh e SoC inicial de 80% e 20%. 101

Tabela 15 – Resultados das simulações para as capacidades total da bateria de 15 kWh, 12,5 kWh, 10 kWh e 7,5 kWh, e taxas de descarga máximas de 4C, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de: a) 80%, b) 20%. 102

Tabela 16 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, para as capacidades total da bateria de 15 kWh, 12,5 kWh, 10 kWh e 7,5 kWh, potência máxima da bateria de 4 C, nos modo CS, para um SoC inicial de 20%. 104

Tabela 17 – Resultados das simulações, nos modos CD e CS, para 15 kWh de capacidade, relativos à potência máxima da bateria de 15 kW e 30 kW, para um SoC inicial de: a) 80%, b) 20%.....	111
Tabela 18 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, para 15 kW, 12,5 kW, 10 kW e 7,5 kW de potência máxima da bateria, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de 20%.....	112
Tabela 19 – Resultados das simulações nos modos CD e CS para 7,5 kWh de capacidade, relativos à potência máxima da bateria de 7,5 kW, 15 kW, 22,5 kW e 30 kW, para um SoC: a) 80%, b) 20%. ...	113
Tabela 20 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, para potência máxima da bateria de 15 kW e 30 kW, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de 20%.	114
Tabela 21 – Resultados das simulações, no modo CD, para um SoC de 80%, relativos ao tempo mínimo de funcionamento do range extender de 30s, 45s e 60s, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.....	122
Tabela 22 – Resultados da simulação, no modo CS, para um SoC inicial de 20%, relativos ao tempo mínimo de funcionamento do range extender de 30s, 45s e 60s, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.....	124
Tabela 23 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus no modo CS, para um SoC inicial de 20%, relativos ao tempo mínimo de funcionamento do range extender de 30s, 45s e 60s, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.	125
Tabela 24 – Resultados das simulações referentes ao estado de carga inicial da bateria (SoC) de 100% 80%, 50% e 20%, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 12,5 kWh, c) 10 kWh e d) 7,5 kWh.	130
Tabela 25 - Resultados das simulações, no modo CD, para um SoC de 80%, e massas do veículo de 1 200 kg, 1 100 kg e 1 000 kg, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh...	138
Tabela 26 – Resultados das simulações, no modo CD, para um SoC de 20%, e massas do veículo de 1 200 kg, 1 100 kg e 1 000 kg, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh...	140
Tabela 27 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus no modo CS, para um SoC inicial de 20%, relativos às massas do veículo de 1 200 kg, 1 100 kg e 1 000 kg, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.....	141
Tabela 28 – Consumos elétrico e de combustível para 7,5 kWh de capacidade da bateria, 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.	146
Tabela 29 – Consumos elétrico e de combustível para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de	

massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.....	147
Tabela 30 – Consumos elétrico e de combustível para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: 7,5 kWh e 15 kWh.	148
Tabela 31 – Consumos elétrico e de combustível para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.	149
Tabela 32 – Variação dos consumos máximos entre a folha Excel e o AVL Cruise.....	150
Tabela 33 – Parâmetros considerados na análise de custos.....	152
Tabela 34 – Preço médio da eletricidade (tarifa simples) praticado em Portugal em dezembro de 2021 [73].....	153
Tabela 35 – Parâmetros considerados na análise de custos relativos a dezembro de 2021 (inclui valores dos parâmetros fixos).	154
Tabela 36 – Comparação entre as diferentes configurações com um veículo convencional [12].	180
Tabela 37 – Ficha técnica do Citroën C1 [55].	209
Tabela 38 – Massas do Citroën C1 [55].	210
Tabela 39 – Sistema de propulsão do Citroën C1 [54].	210
Tabela 40 - Sistema de propulsão do Citroën C1 [54].	210
Tabela 41 – Sistema de transmissão do Citroën C1 [55].	211
Tabela 42 – Prestações, consumos e emissões do Citroën C1 anunciados [54].	211
Tabela 43 – Especificações do kit de conversão da marca Uni [57].	212
Tabela 44 – Especificações do gerador considerado [59].	213
Tabela 45 – Curvas de performance do gerador selecionado [59].	213
Tabela 46 – Especificações do motor de combustão GX 270 [61].	214
Tabela 47 - Características do veículo e modos de operação considerados nas simulações do ciclo de condução.	215
Tabela 48 – Especificações da bateria [77] [69].	220
Tabela 49 – Especificações do motor elétrico e do controlador do motor [57].	222
Tabela 50 – Especificações do gerador [59].	225
Tabela 51 – Especificações do motor térmico [123].	227
Tabela 52 - Especificações dos pneus padrão [55].	230
Tabela 53 – Relação entre o índice de carga e a carga máxima suportada pelo pneu (adaptado de [131]).	231
Tabela 54 – Valores referentes aos pneus, tamanhos, dimensões novas e de uso, jantes autorizadas e	

de capacidade de carga, da série radial 65 [132].....	232
Tabela 55 – Dependência da velocidade da circunferência de rolamento de pneus radiais de veículos de passageiros acima de 60 km/h [142].....	233
Tabela 56 – Variação do SoC para as capacidades da bateria simuladas.....	257
Tabela 57 – Potências elétrica e dissipada máximas para as capacidades da bateria simuladas.	259
Tabela 58 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.	259
Tabela 59 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.	260
Tabela 60 – Binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo para as capacidades da bateria simuladas.	261
Tabela 61 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.	261
Tabela 62 – Consumos elétrico e de combustível máximos para as capacidades da bateria simuladas.	262
Tabela 63 – Variação do SoC para as capacidades da bateria simuladas.....	265
Tabela 64 – Potências elétrica e dissipada máximas para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.	268
Tabela 65 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.	269
Tabela 66 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.	270
Tabela 67 – Binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.	271
Tabela 68 – Binário, rotação e potência mecânica para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.	272
Tabela 69 – Consumos elétrico e de combustível máximos para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.	273
Tabela 70 – Variação do SoC para as massas do veículo simuladas.	276
Tabela 71 – Potências elétrica e dissipada máximas para as massas do veículo simuladas.	278
Tabela 72 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as massas do veículo simuladas. .	280
Tabela 73 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as massas do veículo simuladas. .	282

Tabela 74 – Binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo para as massas do veículo simuladas.	285
Tabela 75 – Binário, rotação e potência mecânica para as massas do veículo simuladas.....	286
Tabela 76 – Consumos elétrico e de combustível máximos para as massas do veículo simuladas. ..	288
Tabela 77 – Custos da conversão do veículo [57] [58] [137] [138].	289
Tabela 78 – Projeção do custo da gasolina 95 simples e da tarifa de eletricidade até ao ano de 2030.	290
Tabela 79 – Evolução da amortização do investimento em função do custo dos combustível/electricidade e poupança alcançada com a conversão.	291

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada (<i>Alternating current</i>)
ADR	Regulador De Desenho Australiano (<i>Australian Design Rule</i>)
API	Interface de Programação da Aplicação (<i>Application Programming Interface</i>)
AVL	Empresa avl gmbh (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List)
BEV	Veículo Elétrico a Baterias (<i>Battery Electric Vehicle</i>)
CCS	Sistema de Carga Combinado (<i>Combined Charging System</i>)
CD	Esgotamento de Carga (<i>Charge Depleting</i>)
CHAdeMO	Protocolo de Carregamento Rápido (<i>CHArge DE MOve</i>)
CS	Sustentação de Carga (<i>Charge Sustaining</i>)
DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
DoD	Profundidade de Descarga (<i>Depth of Discharge</i>)
ECE	Comissão Económica para a Europa (<i>Economic Commission for Europe</i>)
ECM	Motor Comutado Eletronicamente (<i>Electronically Commutated Motor</i>)
ECU	Unidade de Controlo do Motor (<i>Engine Control Unit</i>)
EPA	Agência de Proteção Ambiental (<i>Environmental Protection Agency</i>)
FCEV	Veículo Elétrico de Célula de Combustível (<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>)
f.e.m.	Força eletromotriz
FEV	Empresa AVL GmbH (Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren)
GDI	Injeção Direta de Gasolina (<i>Gasoline Direct Injection</i>)
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GUI	Interface Gráfica do Utilizador (<i>Graphical User Interface</i>)
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
HEV	Veículo Elétrico Híbrido (<i>Hybrid Electric Vehicle</i>)
HRB	Travagem Regenerativa Hidráulica (<i>Hydraulic Regenerative Brake</i>)
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IM	Motor de Indução (<i>Induction Motor</i>)
IPMSM	Motor Síncrono de Ímanes Permanentes Interiores (<i>Interior Permanent Magnet Synchronous Motor</i>)

IPMSynRM	Motor Síncrono de Relutância de Ímanes Permanentes Interiores (<i>Internal Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor</i>)
KERS	Sistema de Recuperação da Energia Cinética (<i>Kinetic Energy Recovery System</i>)
KSPG	Empresa Kolbenschmidt Pierburg Automotive AG
LaMoTA	Laboratório de Motores e Termodinâmica Aplicada
LSRM	Motor Linerar de Relutância Comutada (<i>Linear Switched Reluctance Motor</i>)
MCI	Motores de Combustão Interna
MHEV	Veículo Elétrico Micro Híbrido (<i>Mild Hybrid Electric Vehicle</i>)
NEDC	Novo Ciclo de Condução Europeu (<i>New European Driving Cycle</i>)
NOVC	Sem Carregamento Exterior (<i>Not Off Vehicle Charging</i>)
OCV	Tensão de Circuito Aberto (<i>Open Circuit Voltage</i>)
OHV	Válvula Sobre a Cabeça (<i>Over Head Valve</i>)
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEM	Membrana de Troca de Protões (<i>Proton Exchange Membrane</i>)
PEV	Veículo Elétrico Puro (<i>Pure Electric Vehicle</i>)
PHEV	Veículo Elétrico de Ficha (<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>)
PID	Proporcional–Integral–Derivativo
PMI	Ponto Morto Inferior
PMR	Rácio Potência-Massa (<i>Power-to-Mass Ratio</i>)
PMS	Ponto Morto Superior
PMSM	Motor Síncrono de Ímanes Permanentes (<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>)
RE	Extensor de Autonomia (<i>Range Extender</i>)
REEV	Veículo Elétrico Com Extensor de Autonomia (<i>Range Extended Electric Vehicle</i>)
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automóveis (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
SEMA	Associação do Mercado de Equipamentos de Especialidade (<i>Specialty Equipment Market Association</i>)
SoC	Estado de Carga (<i>State of Charge</i>)
SRM	Motor de Relutância Comutada (<i>Switched Reluctance Motor</i>)
UF	Fator de ponderação do consumo de combustível oficial entre os modos CD e CS (<i>Utility Factor</i>)
UN	Nações Unidas (<i>United Nations</i>)
VDE	Associação Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik E.V.

VE	Veículo Elétrico
VVT-i	Válvula Variável de Sincronização Inteligente (<i>Variable Valve Timing – Intelligent</i>)
WLTC	Ciclo Mundial harmonizado de Teste de Veículos ligeiros (<i>Worldwide harmonized Light-Duty vehicles Test Cycle</i>)
WLTP	(Procedimento Mundial Harmonizado de Teste de Veículos ligeiros) (<i>Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleração	m/s^2
A	Área frontal do veículo	m^2
A	Largura da secção do pneu	mm
AD_{sem}	Autodescarga semanal	%
$Auton$	Autonomia	km
B	Relação da secção cruzada do pneu com a respetiva largura	%
$BSFC$	Consumo específico de combustível	g/kWh
C	Capacidade da bateria	Ah
C	Diâmetro da jante	"
$Cons_{access}$	Consumo dos acessórios	$kWh/100\text{ km}$
C_B	Coefficiente de atrito	[-]
Cap_{bat}	Capacidade do <i>pack</i> de baterias	Ah
C_d	Coefficiente de arrasto	[-]
$Cons_{méd}$	Consumo médio	$kWh/100\text{ km}$
Cap_{nec}	Capacidade necessária	Ah
Cap_{nom}	Capacidade nominal	Ah
C_R	Circunferência de rolamento	mm
$C_{R,dyn}$	Circunferência de rolamento dinâmico	mm
$Cons$	Consumo	$kWh/100\text{ km}$
DoD	Profundidade de descarga	%
E	Energia; Energia dispendida	Wh
E_{bat}	Energia do <i>pack</i> de baterias	Wh
E_{nec}	Energia necessária	Wh
f	Frequência	Hz
F_{ad}	Força de arrasto aerodinâmico	N
F_{hc}	Força para vencer um declive	N
F_{la}	Força para uma aceleração	N
F_{rr}	Força de resistência ao rolamento	N
F_{te}	Força total de tração	N
F_{coa}	Força da aceleração angular	N

g	Aceleração da gravidade	m/s^2
G	Relação de transmissão	[-]
I	Momento de inércia	$kg.m^2$
k_v	Dependência da velocidade da circunferência de rolamento de pneus radiais	%
K_{fuel}	Coefficiente de correção do consumo	$(L/100 \text{ km}) / (kWh/100 \text{ km})$
m	Massa	kg
\dot{m}	Caudal mássico	g/h
M_P	Consumo de combustível por hora	kg/h
n_P	Número de baterias em paralelo	[-]
n_S	Número de baterias em série	[-]
N_{km}	Número de quilómetros	[-]
N_{ph}	Número de fases elétricas	[-]
N_s	Número de dentes do estátor	[-]
ρ	Par de polos magnéticos	[-]
p_p	Pressão nos pneus	bar
P_{BOOST}	Potência elétrica gerada pelo motor + gerador no modo BOOST	W
P_{comb}	Potência térmico libertada pelo combustível	W
P_E	Potência efetiva do motor	W
P_{ECO}	Potência elétrica gerada pelo motor + gerador no modo ECO	W
$P_{m\acute{a}x}$	Potência máxima	W
P_{mec}	Potência mecânica	
P_{motor}	Potência do motor elétrico	W
P_{motriz}	Potência motriz	W
P_{regen}	Potência da travagem regenerativa	W
PCI	Poder Calorífico Inferior	kWh/kg
PMR	Relação potência-massa	kW/kg
r	Raio; Raio do pneu; Raio da roda motriz	m
R	Tipo de construção interna do pneu	[-]
S	Distância do percurso efetuado	km
SoC	Estado de carga (<i>State of Charge</i>)	%

T	Binário	Nm
T	Temperatura ambiente	°C
U_{OCV}	Tensão em circuito aberto	V
v	Velocidade	m/s
V_{bat}	Tensão nominal do <i>pack</i> de baterias	V
V_{unit}	Tensão da bateria unitária	V
η_g	Eficiência do sistema de engrenagens	%
η_{mot}	Rendimento do motor	%
η_{motriz}	Rendimento do motor	%
η_{regen}	Rendimento da travagem regenerativa	%
ρ	Massa volúmica do ar	kg/m ³
μ_{rr}	Coefficiente de atrito de rolamento	[-]
ω	Velocidade angular	rad/s
$\dot{\omega}$	Aceleração angular	rad/s ²
ψ	Ângulo que o automóvel faz com o plano horizontal	°

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O aumento anormal da concentração de gases com efeito de estufa (G.E.E.) na atmosfera causado pela atividade humana na era industrial é comumente apresentado como sendo responsável pelo fenómeno do aquecimento global e pelas alterações climáticas a ele associadas. A preocupação com este potencial risco e a busca de formas de o mitigar tem levado a um enorme esforço de redução das emissões de G.E.E. e à implementação de políticas de "descarbonização" da economia com o objetivo de "neutralidade carbónica" da economia em 2050.

Dado que o setor dos transportes é um dos setores que mais contribui para as emissões de G.E.E., o estímulo para a adoção de tecnologias de baixas emissões é naturalmente enorme.

O motor de combustão interna usado na propulsão da maioria dos veículos da atualidade é o grande responsável por estas emissões pois usa combustível que na sua maioria é de origem fóssil. A sua sustentabilidade pode ser assegurada pelo uso de combustíveis provenientes de fontes renováveis, nomeadamente através da valorização de biomassa e de resíduos. Outra forma de melhorar a sustentabilidade dos veículos é o uso da propulsão elétrica, tendo em conta as suas vantagens de não produzirem poluentes ou G.E.E. na sua utilização, do seu bom potencial de eficiência energética e da versatilidade de fontes de energia usadas na produção de energia elétrica, a mobilidade elétrica tem sido privilegiada pelos decisores políticos a nível global como a tecnologia a ser promovida em detrimento dos motores de combustão com combustíveis sustentáveis.

Assim, a indústria automóvel, muito pelas sucessivas restrições à circulação de veículos com motores de combustão interna impostas pelos diversos governos a nível mundial, que têm tornado o desenvolvimento de motores Diesel e gasolina cada vez mais difícil e caro, tem investido na investigação e desenvolvimento de soluções que passam pela mobilidade elétrica [1].

Os principais entraves à massificação dos veículos elétricos são o seu elevado preço, a reduzida autonomia e os problemas práticos ligados ao seu carregamento, como seja o tempo para o fazer e a disponibilidade de pontos de carregamento público e privado [2]. No intuito de minimizar estes problemas, alguns construtores têm desenvolvido extensores de autonomia (*range extender*) que permitem a produção local de eletricidade após a descarga das baterias, o que torna possível o uso prático de um veículo elétrico com uma bateria pequena e barata sem as limitações de autonomia em viagens longas ocasionais e sem a dependência crítica da disponibilidade de pontos de

carregamento [3][4].

Há assim interesse na massificação dos veículos elétricos, com utilização de veículos de baixo custo para circulação urbana e suburbana. Uma possibilidade será a conversão de veículos existentes, a qual pode ainda contemplar a inclusão de um pequeno *range extender*, o que permitirá a sua utilização ocasional em percursos mais longos.

O *range extender* e as baterias podem ser geridos de várias formas. Uma opção passa por, numa primeira fase desativar o *range extender* e a bateria ser descarregada para fornecer energia elétrica ao motor elétrico, com esta opção a ser aplicada até um estado de carga pré-definido. Assim que o nível da bateria for inferior ao limite a esse valor, o *range extender* é ativado e a energia proveniente tanto da bateria como do *range extender* servirá para alimentar o motor elétrico.

A potência do *range extender* pode ser variável, o que permite fornecer ao propulsor elétrico a potência requerida em cada instante, sem nunca carregar diretamente as baterias. A vantagem desta forma de gestão reside no facto de serem eliminadas as perdas de energia que ocorrem nos ciclos de carga e descarga da bateria, no caso em que fosse produzida energia em excesso por parte do RE (*Range Extender*). Outra alternativa passa por considerar dois regimes de funcionamento fixos do extensor de autonomia, nomeadamente, um ponto de funcionamento de baixa potência, mas máxima eficiência energética (ponto ECO) e um ponto de maior potência obtido à custa de uma menor eficiência energética (ponto BOOST). Para minimizar a ineficiência associada ao ciclo de carregamento e descarregamento da bateria, o motor elétrico é preferencialmente quem recebe a potência produzida. Quando a potência requerida pelo motor elétrico é inferior à produzida, ocorre o direcionamento do excesso de potência, para que assim recarregue a bateria. Se a potência produzida no primeiro modo (ECO) não for suficiente, o RE altera o seu modo de funcionamento para o ponto BOOST. Após ser ultrapassado o nível de carga da bateria definido, o RE é novamente desativado [5].

Em suma, a utilização dos *range extender* permite acabar com o novo conceito criado para os condutores de veículos elétricos, denominada de *range anxiety* (ansiedade da autonomia). Este estado de ansiedade é sentido mediante a possibilidade de o veículo ficar sem energia num local onde não seja possível efetuar um recarregamento, pelo que deixa de ter razão de existir, uma vez que nos veículos equipados com *range extender*, a autonomia do veículo está apenas dependente da capacidade do depósito de combustível. A grande vantagem deste sistema consiste na possibilidade de mudar a forma como ainda se olha os veículos elétricos como apenas poderem ser utilizados para pequenas deslocações.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação passa por fazer uma análise da viabilidade técnica e económica da conversão de um pequeno veículo citadino para um veículo de tração elétrica, de modo a atingir uma autonomia de 100 km, com uma velocidade máxima de 100 km/h e o consumo elétrico associado não superior a 10 kWh/100 km.

Além do que foi descrito no parágrafo anterior, pretende-se ainda incorporar um pequeno motor térmico acoplado a um gerador elétrico, de modo a atuar como extensor de autonomia (*range extender*).

Para a obtenção do objetivo proposto, foi selecionado um *kit* de conversão para veículo elétrico disponível no mercado, em que o mesmo possuísse um motor e gerador elétricos com uma potência a rondar os 10 kW, bem como um pack de baterias com uma capacidade total de, aproximadamente, 10 kWh.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em vários capítulos, dos quais se fará agora uma breve descrição.

No Capítulo 1, é feita a introdução ao tema abordado na dissertação, a que se segue o Capítulo 2 onde são apresentados os conceitos necessários para acompanhar e compreender os conteúdos, nomeadamente os tipos de veículos elétricos existentes atualmente no mercado, os vários motores elétricos, geradores, controladores e baterias. No último subcapítulo inserido na revisão bibliográfica são abordados os carregadores e conectores usados na mobilidade elétrica.

No Capítulo 3 são abordados os fundamentos teóricos que servem de base às simulações efetuadas no capítulo seguinte.

No Capítulo 4 é apresentada a seleção do veículo convencional existente no mercado, que serviu de base para o projeto. Nesta análise foram tomados em consideração diversos aspetos tais como dimensões do veículo, categoria de circulação (possibilidade de circular em autoestrada), nível de consumo de combustível e desempenho. É feita também a seleção dos componentes que serão considerados para as simulações.

No Capítulo 5 expõem-se os programas utilizados nas simulações, nomeadamente os *software* Microsoft Excel e AVL Cruise, com a descrição da análise teórica por detrás dos parâmetros considerados e valores associados às várias simulações.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados experimentais obtidos após a realização das simulações, com a posterior análise aos mesmos, comparando-os, de forma a verificar se há coincidência de resultados.

O Capítulo 7 apresenta uma análise de custos relativamente ao preço do combustível e preço da energia elétrica (para uma potência contratada de 3,45 kVA) que se aplicam aos veículos convencionais e elétricos, respetivamente.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões obtidas com a realização desta dissertação e deixa algumas sugestões de trabalho futuro, para que se possam consolidar as conclusões retiradas e facilitar projetos posteriores relacionados com este.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Veículos elétricos

Os veículos elétricos são amplamente aceites como soluções emergentes e sustentáveis aos desafios ambientais e de transporte num mundo em constante crescimento. Além disso, a implementação de controlo *drive-by-wire* e os novos sistemas de informação podem aumentar significativamente a segurança e eficiência energética dos VE [6].

A energia elétrica pode ser convertida em energia mecânica utilizando um motor elétrico. O funcionamento dos motores elétricos ocorre com a interação entre os campos elétrico e magnético do motor e os enrolamentos que geram binário que promove a rotação. Um gerador elétrico é mecanicamente semelhante a um motor elétrico, mas funciona no sentido inverso, uma vez que converte a energia mecânica produzida em energia elétrica.

Em meados do século XIX, com o fabrico do primeiro carro elétrico (1835), os veículos elétricos surgiram pela primeira vez como meio de propulsão de veículos motorizados, na altura em que a eletricidade estava entre os métodos preferidos, proporcionando um nível de conforto e facilidade de operação que não podiam ser alcançados pelos carros a gasolina da época [7].

Os primeiros recordes de velocidade terrestre, em 1889 e 1900, foram alcançados por carros elétricos. Contudo, na década de 1910, as debilidades da bateria e da rede elétrica, aliadas à rápida evolução dos motores de combustão interna numa era de ascensão do petróleo acabaram por deixar de lado a mobilidade elétrica [8].

Os veículos topo de gama atuais utilizam arquiteturas incorporadas que consistem em até 100 unidades de controlo do motor com vários barramentos heterogêneos que estão interligados por uma ou mais portas de entrada, como ilustrado na **Figura 1**.

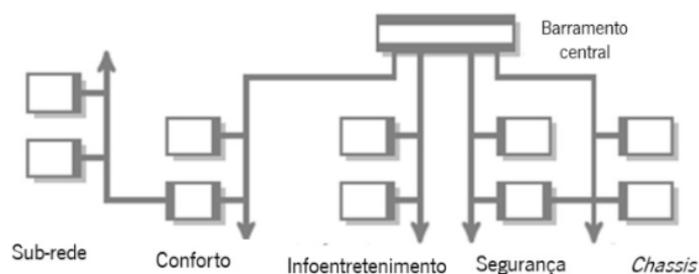


Figura 1 – Arquitetura típica da rede de automóveis modernos, com várias unidades de controlo do motor ligadas a diferentes barramentos (adaptado de [6]).

A arquitetura ou configuração dos veículos elétricos está relacionada com a disposição do

armazenamento de energia e dos componentes relativos à tração de um veículo elétrico, sendo mais flexível quando comparada com os veículos convencionais movidos por motores de combustão interna, uma vez que não há a configuração complexa do motor, embraiagem, requisitos no que respeita ao sistema de transmissão manual, tubo de escape, etc, pois dispõe de uma gama de binário e velocidade de rotação larga, tendo até binário a velocidade nula. Em suma, os componentes que compõem um veículo elétrico são o motor, o controlador, o armazenamento de energia elétrica e o sistema de transmissão.

Existem várias arquiteturas dos VE devido aos diferentes sistemas de acionamento elétrico. Na **Figura 2** são apresentadas a maior parte das arquiteturas possíveis nos veículos elétricos [9].

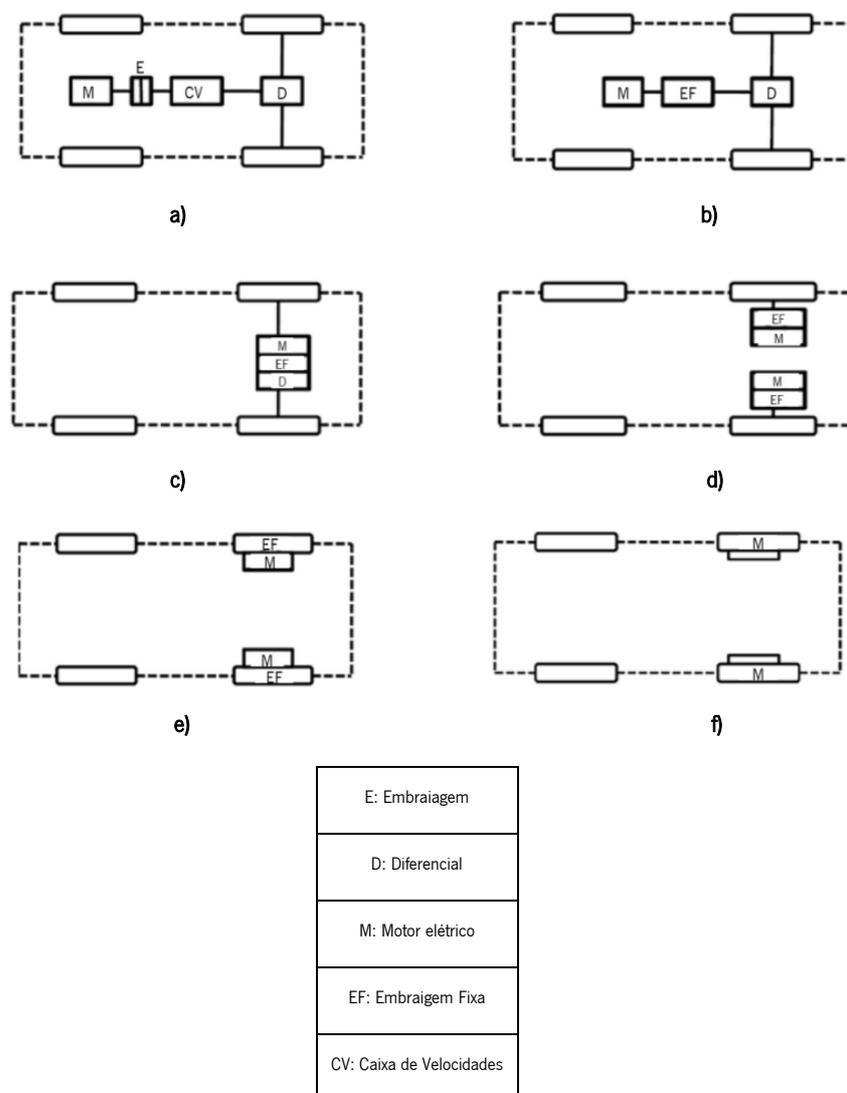


Figura 2 – Arquiteturas do sistema de acionamento dos VE'S: a) com embraiagem, caixa de velocidades e diferencial; b) com motor elétrico, caixa de velocidades com apenas uma velocidade e diferencial; c) com motor, embraiagem fixa e diferencial como unidade única; d) com dois motores elétricos acoplados a duas rodas separadas através da engrenagem fixa; e) com motor *in-wheel* junto com engrenagem fixa; f) com motor *in-wheel* sem engrenagem (adaptado de [9]).

A **Figura 2 a** apresenta uma arquitetura do motor elétrico em que a embraiagem engrena e desengrena, transferindo potência do motor elétrico para as rodas como os motores de combustão interna. Esta configuração é usada principalmente na conversão de veículos com motores de combustão interna para elétricos.

A **Figura 2 b** representa um único motor elétrico com caixa de velocidades de apenas uma velocidade. Algumas conversões de veículos que recorrem a motores elétricos sem sistema de transmissão usam esta configuração.

A **Figura 2 c** ilustra um sistema com motor elétrico, tração traseira, caixa de velocidades de uma velocidade e diferencial integrados num sistema só, sendo a arquitetura mais usada pelos construtores automóveis.

A **Figura 2 d** apresenta uma arquitetura bimotora, em que o diferencial pode ser controlado eletronicamente por dois motores elétricos que operam a velocidades diferentes, com as rodas motrizes acionadas por dois motores elétricos em separado, através da caixa de velocidades de apenas uma velocidade.

A **Figura 2 e** mostra uma arquitetura com um sistema de engrenagem planetária fixa usada para reduzir a velocidade do motor para a velocidade da roda pretendida. Este sistema é designado de sistema de tração *in-wheel*.

A **Figura 2 f** ilustra um sistema sem engrenagens mecânicas. No interior das rodas é instalado um motor elétrico com rotor exterior de funcionamento a baixas rotações.

No que respeita às arquiteturas da propulsão elétrica dividem-se em [10]:

- Veículos elétricos a bateria (BEV);
- Veículos elétricos híbridos simples (HEV);
- Veículos híbridos plug-in (PHEV), na qual se enquadram os veículos com *range extender*;
- Veículos *mild hybrid* (MHEV);
- Veículos elétricos com células de combustível (FCEV).

Estas classificações aplicam-se a todos os híbridos (plug-in ou não plug-in), com praticamente todos os HEV a terem uma arquitetura paralelo, série ou paralelo-série.

2.1.1. Veículos Elétricos a Bateria (BEV)

Os veículos elétricos a bateria (*Battery Electric Vehicle*) também conhecidos por veículos puramente elétricos contêm um *pack* de baterias conectado a um motor elétrico, não possuindo motor de combustão e, portanto, apenas recorrem à eletricidade armazenada nas baterias para a sua propulsão.

Inicialmente procede-se ao carregamento das baterias, podendo os carregadores ser *on-board* ou *off-board*. Estes dois conceitos serão abordados mais à frente, no capítulo referente aos tipos de carregadores. Nas travagens regenerativas, o motor funciona como um gerador (M/G) e devolve energia às baterias enquanto desacelera o veículo.

Uma das principais vantagens dos VE's está relacionada com a simplicidade no *design* e operação com um baixo número de componentes. Contudo, os elevados tempos de carregamento (podem durar entre quinze minutos, podendo atingir um dia inteiro de carregamento), e o custo elevado das baterias apresentam-se como importantes desvantagens deste tipo de veículos [6].

A **Figura 3** mostra a configuração típica dos BEV.

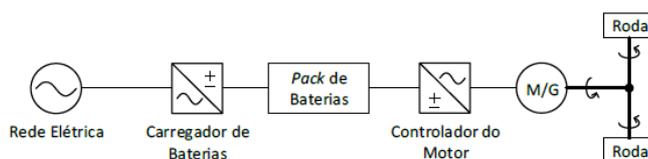


Figura 3 – Configuração típica do BEV (arquitetura em série) [11].

2.1.2. Veículos Híbridos Elétricos Simples (HEV)

Os veículos híbridos elétricos simples (*Hybrid Electric Vehicle*) são constituídos por um *pack* de baterias, um controlador de motor, um motor/gerador, um motor de combustão interna, uma transmissão e o conjunto de elementos envolvidos na tração dos mesmos. O carregamento das baterias dá-se apenas através do motor de combustão interna e do gerador, sem possibilidade de carregamento exterior ao veículo. O componente principal de eletrónica de potência utilizado é o conversor de corrente contínua/corrente alternada (CC/CA) que fornece alimentação trifásica a um motor síncrono de ímanes permanentes, podendo, no entanto, os motores serem também uma fonte de alimentação [11].

Na **Figura 4** é possível observar a configuração típica dos HEV's, no caso do Toyota Prius HEV.

A escolha da configuração de um veículo elétrico híbrido é influenciada por vários fatores, tais como motor de combustão interna, motor elétrico, sistema de armazenamento de energia, conversor de potência e sistema de transmissão às rodas. Para que o projeto de desenvolvimento seja bem sucedido é necessária uma coordenação do fluxo de energia entre os vários constituintes.

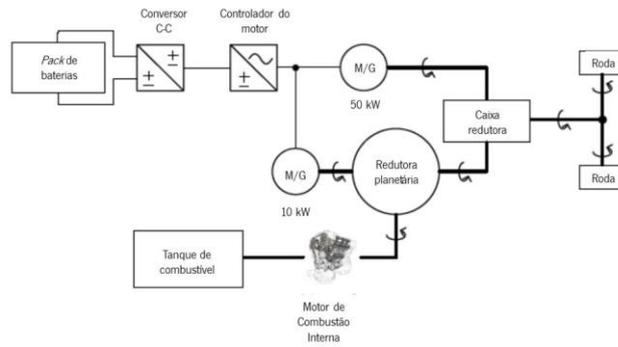


Figura 4 – Configuração paralelo-série presente no Toyota Prius HEV [11].

As configurações base são classificadas com base na interligação entre o motor de combustão interna e o sistema de propulsão do veículo [12]:

- híbrido série;
- híbrido paralelo;
- híbrido série-paralelo.

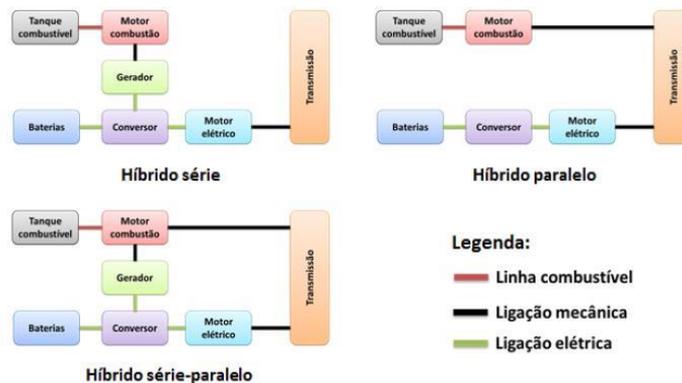


Figura 5 – Configuração – base dos das várias arquiteturas dos veículos elétricos híbridos [12].

No Anexo A são apresentadas com mais detalhe as características de cada configuração de veículo híbrido.

2.1.3. Veículos Híbridos Elétricos *Plug-in* (PHEV)

Os veículos híbridos elétricos *plug-in* (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) consistem nos mesmos componentes base dos HEV's abordados no ponto anterior.

No entanto, os PHEV's podem ser carregados por uma fonte externa, através da incorporação de um conversor CA/CC para fazer a transformação da energia fornecida pela rede elétrica, de modo às baterias serem carregadas. O carregamento pode ainda ser feito através de uma fonte de energia solar, sendo

necessário um conversor CC/CC, ou através de uma fonte de energia eólica utilizando assim um conversor CA/CC.

A grande diferença deste tipo de motorização reside no facto de, ao poder ser carregado externamente, possui normalmente baterias maiores e um motor elétrico mais potente. Isto permite que possam realizar viagens pequenas e frequentes em modo totalmente elétrico, garantindo assim uma redução no consumo de combustíveis fósseis. O carregamento é feito de forma unidirecional, isto é, apenas há transmissão da rede elétrica para o *pack* de baterias [11].

Na secção anterior já foram referidas a três arquiteturas base dos HEV, que são comuns ao PHEV, estando presente na **Figura 6** uma configuração dos PHEV's, em concreto do Toyota Prius PHEV, em que se podem ver as semelhanças com a configuração do Toyota Prius HEV da **Figura 4**.

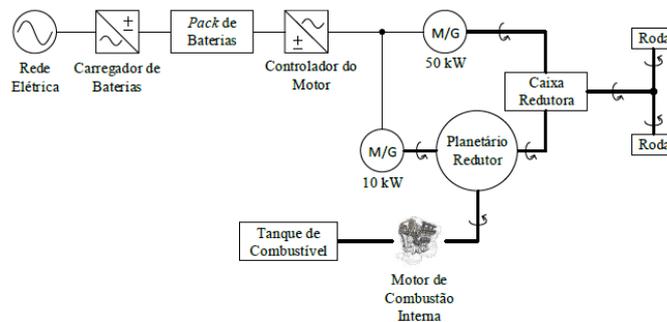


Figura 6 – Configuração do Toyota Prius PHEV [11].

2.1.4. Veículos Elétricos *Mild Hybrid* (MHEV)

Os veículos elétricos *mild hybrid* (*Mild Hybrid Electric Vehicle*) são constituídos por um motor de combustão, mais uma máquina elétrica que funciona como uma espécie de gerador/alternador de alta capacidade ou como um motor elétrico de muito baixa potência que auxilia o arranque do veículo e quando muito ajuda o motor de combustão no início de marcha.

Este sistema é classificado como *mild hybrid* porque a máquina elétrica funciona como um gerador de energia, e não primariamente como um motor.

O sistema *mild hybrid* não pode funcionar exclusivamente com um motor elétrico, a não ser em muitos baixos regimes. O motor elétrico de um sistema *mild hybrid*, com um sistema elétrico de voltagem inferior a 60 V, serve apenas para auxiliar o motor a combustão e não necessita ser ligado a uma fonte de energia para carregar.

A grande inovação deste sistema elétrico consiste no motor a combustão (gasolina ou diesel) se poder desligar quando o veículo circula abaixo de 17 km/h, ou quando estiver em desaceleração (abaixo

também desta velocidade, podendo proporcionar algum grau de travagem regenerativa).

Este novo sistema pode ser considerado, na realidade, como um sistema *start/stop* mais avançado.

2.1.5. Veículos a Células de Combustível (FCEV)

Os veículos a células de combustível (*Fuel Cell Electric Vehicle*) são veículos que, além de uma bateria, possuem também um reservatório de hidrogénio e um sistema de células de combustível, onde esse hidrogénio produz eletricidade adicional através de uma reação química que não envolve a combustão. A utilização de uma reação química (isotérmica) para produzir a eletricidade através do hidrogénio não provoca a combustão do combustível, pelo que são isentas de emissões poluentes.

Este tipo de veículos assemelha-se, a nível da configuração aos BEV, residindo a diferença no facto dos FCEV necessitarem de um tanque de hidrogénio pressurizado que alimenta as células, que posteriormente carregam as baterias através de um conversor CC/CC [11].

Na **Figura 7** encontra-se ilustrada uma configuração dos FCEV.

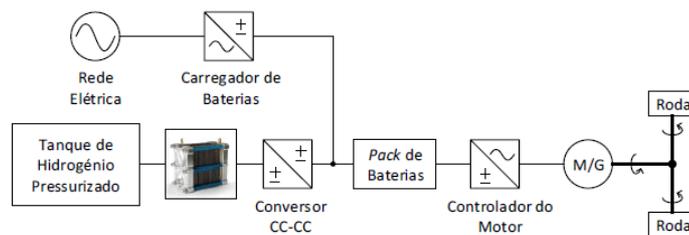


Figura 7 – Configuração típica do FCV [11].

2.1.6. Veículos elétricos com *range extender*

O sistema *range extender* enquadra-se num tipo específico de PHEV, concretamente os híbrido-série, e encontra-se habitualmente instalado no interior do veículo (*on-board*), e corresponde a uma fonte auxiliar de produção de energia, composta por:

- motor de combustão interna;
- gerador elétrico capaz de converter a energia mecânica fornecida pelo motor em energia elétrica;
- conversor de potência responsável pela interface entre o gerador e o barramento CC do veículo.

No contexto da indústria automóvel, o objetivo da sua aplicação é converter a energia armazenada num qualquer tipo de combustível em energia elétrica, que será utilizada pelo sistema de tração do

veículo [13].

Atualmente ainda não foram explorados os *range extender* de baixa potência e baixo custo aplicados em carros pequenos citadinos com baterias pequenas. Com o desenvolvimento deste tipo de veículos, poderá dar origem a carros elétricos de baixo custo e sem problemas de autonomia.

No que respeita à escolha do extensor de autonomia podem ser escolhidas várias abordagens diferentes [14]:

1. semelhança entre o carro elétrico e o carro “normal”, razão pela qual o *range extender* deverá ser um motor “normal”, com a diferença de estar ligado a um gerador elétrico;
2. o *range extender* deverá dar primazia à eficiência, de modo a estar de acordo com a lógica de acompanhar a eficiência presente nos veículos elétricos;
3. dado o curto espaço de tempo e reduzido número de vezes em que operará, o extensor de autonomia deverá ter como prioridade na sua conceção a massa e compacidade, de modo a ser facilmente integrado no veículo.

A primeira filosofia foi implementada pela GM (General Motors) no Chevrolet Volt e Opel Ampera, que se caracterizaram como carros elétricos semelhantes aos carros de tração de motor de combustão interna. O *range extender* um motor convencional da GM, com 4 cilindros e 1.4 L, atuando a velocidade e carga variável, conforme as necessidades de potência do carro. Havia uma ligação entre o *range extender* e as rodas através de um sistema epicicloidal que fazia a ligação do motor elétrico ao gerador do motor elétrico e às próprias rodas.

Na segunda filosofia seriam usados motores de combustão de ciclo eficiente, como o caso de motores de ciclo sobre-expandido ou ciclo de Diesel, uma vez que trabalhavam apenas num determinado ponto de velocidade e carga, com o seu desenho a ser otimizado para esta situação, podendo ter uma eficiência superior aos motores convencionais. A principal desvantagem dos motores sobre-expandidos prendia-se com a potência bastante mais baixa em comparação à potência máxima de um motor de igual cilindrada. No entanto, este entrave podia ser atenuado com o uso de 2 pontos de funcionamento (um verdadeiramente eficiente e outro de elevada potência).

Esta filosofia tem sido explorada pelo Laboratório de Máquinas Térmicas da UM (LaMoTA) e é a filosofia que é implementada no trabalho presente [15].

Na **Figura 8** é possível ver o *range extender* desenvolvido pela AVL (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List), que consiste num sistema motogerador que entrega dois níveis de

potência (15 e 25 kW), ao passo que o extensor de autonomia da empresa FEV (Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren) produz 20 kW, ambos a partir de motores Wankel [14].

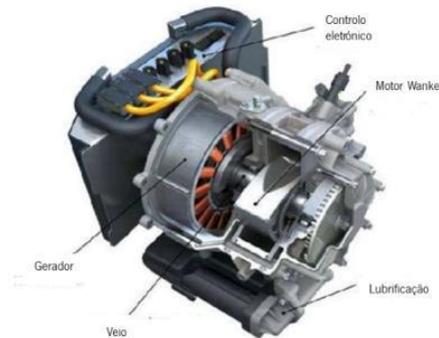


Figura 8 – Range extender da AVL (adaptado de [16]).

O extensor de autonomia com menor potência (15 kW) tem uma massa de 29 kg. Juntamente com o inversor, o sistema de arrefecimento eletrônico e a interface que o liga ao sistema de arrefecimento do veículo perfaz uma massa total de 65 kg .

O protótipo do carro tem um conjunto de baterias para armazenamento de energia elétrica de 10 kWh, o que permite alcançar 30 km em modo puramente elétrico. O *range extender* da AVL tem uma potência de 15 kW e um depósito de combustível de 10 dm³, apresenta uma autonomia de pelo menos 200 km, e uma aceleração 0-100 km/h em 12 s.

No Congresso Mundial de 2009 da SAE (*Society of Automotive Engineers*), a FEV Motorentechnik GmbH Aachen apresentou um extensor de autonomia para um veículo elétrico, no qual o gerador era acionado por um motor Wankel de rotor único de um toróide com 295 cm³ de cilindrada (**Figura 9**). A utilização do motor deste tipo permitia uma redução significativa no nível de vibrações e emissões de ruído. As vantagens adicionais do motor Wankel nesta aplicação eram as dimensões extremamente pequenas e o baixo peso em curva [16].



Figura 9 – Range Extender da FEV, com rotor Wankel apresentado no Congresso Mundial de 2009 da SAE [16].

Em setembro de 2011, a Kolbenschmidt Pierburg (agora KSPG) juntamente com a FEV apresentou o conceito de unidade de potência auxiliar compacta *on-board* para veículo elétrico, com base no motor

de ignição por faísca V-2 de 90° com cambota vertical, conforme o modelo apresentado na **Figura 10**.

Neste conceito existem dois geradores elétricos síncronos com ímanes permanentes (PMSM) com quatro pares de polos ligados em série que são acionados a partir do motor através de um trem de engrenagens. A utilização de dois geradores acionados por engrenagens a partir do motor permite uma redução significativa da irregularidade de funcionamento do motor de cilindro *V-twin* [16].



Figura 10 – Vista geral do *range extender* desenvolvido pela Kolbenschmidt Pierburg – FEV [16].

A Lotus Engineering em cooperação com a Fagor Ederlan tem desenvolvido vários tipos de extensores de autonomia. A empresa Lotus é responsável pelo desenvolvimento de motores de combustão interna, enquanto a Fagor Ederlan fornece geradores e controladores. As três versões do *range extender* são construídas com base no motor de ignição por faísca, montadas diretamente no gerador da cambota com ímanes permanentes. A versão básica do motor de aspiração natural tem três cilindros e uma cilindrada de 1 299 cm³ (**Figura 11**). O extensor de autonomia pode ser montado verticalmente ou horizontalmente, com todas as unidades a cumprirem a norma Euro 6 [16].



Figura 11 – *Range extender* da Lotus & Fagor com motor em linha naturalmente aspirado [16].

Em 2011, a Mahle Powertrain Ltd. Lançou um extensor de autonomia compacto com uma potência nominal de 30 kW às 4 000 rpm, concebido para utilização em veículos do segmento C.

O *range extender* apresentado na **Figura 12** foi construído com base num motor de combustão interna com ignição por faísca de dois cilindros em linha, com uma cilindrada de 900 cm³, com o combustível injetado no tubo de admissão. Do mesmo modo, como nas outras soluções, o gerador de energia elétrica é montado diretamente na cambota do motor. Apresenta uma massa de 70 kg e um

consumo mínimo específico de combustível de 240 g/kWh [16].



Figura 12 – Range Extender da Mahle [16].

Além das marcas referidas anteriormente, existem outras empresas que desenvolveram microturbinas, como o caso da Bladon Jets (**Figura 13 a**), que desenvolveu uma microturbina para a Jaguar, que roda a 80 000 rpm e debita 70 kW, com uma massa de 35 kg. Embora as microturbinas tenham uma eficiência muito inferior aos motores a pistão, é aumentada através da regeneração, como o caso das microturbinas da Capstone (**Figura 13 b**), que são bastante usadas em autocarros híbridos de vários países [16].

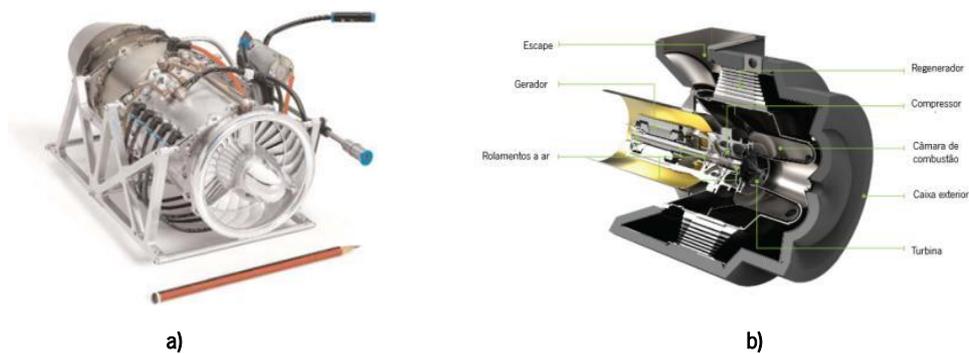


Figura 13 – a) microturbina da Bladon Jets [17]; b) microturbina da Capstone (adaptado de [18]).

Na **Tabela 1** é apresentada a comparação entre vários extensores de autonomia disponíveis no mercado:

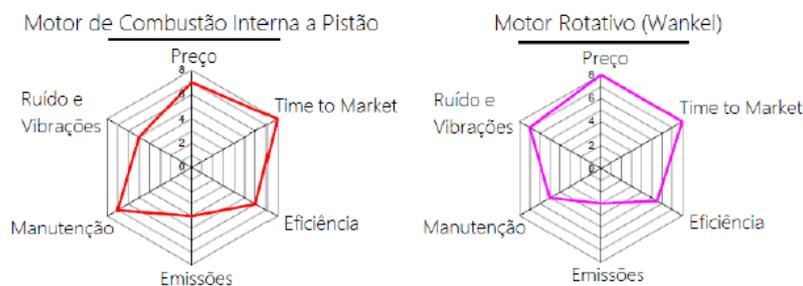
Tabela 1 – Comparação entre vários *range extenders* disponíveis no mercado (adaptado de [14]).

Marca	Tipo	Cilindrada (cm³)	Velocidade (rpm)	Potência (kW)	Consumo (g/kWh)	Massa (kg)
AVL	Wankel	250	5 000	15	260	65
Bladon Jets	microturbina		80 000	70	> 300	35
Engiro	Wankel		5 000	15		32
Lotus	pistão, 2 cil.	866	3 500	23	240	45
Mahle	pistão, 2 cil.	900	4 000	30	240	50

Apesar de todos os modelos apresentados anteriormente, muitos destes modelos não chegaram ao mercado e atualmente não existe no mercado uma oferta diversificada e massiva de *range extenders*, e os que existem não apresentam quaisquer dados relativamente a prestações e emissões, pelo que não é possível avaliar a viabilidade dos mesmos.

Atualmente existem extensores de autonomia com o princípio básico de funcionamento dividido em quatro categorias. O primeiro princípio de funcionamento consiste na utilização do habitual motor de combustão interna com pistões acoplado a um gerador elétrico; o segundo recorre a um motor de combustão do tipo rotativo (motor Wankel) acoplado a um gerador elétrico; o terceiro utiliza uma microturbina para acionar o gerador elétrico; o último modo funciona à base de células de combustível.

A comparação entre os vários extensores de autonomia apresentados pode ser vista na **Figura 14**, e é baseada em propriedades como o preço, eficiência, nível de emissões de gases poluentes, custos de manutenção, barulho e vibrações, e *time-to-market*. Cada um dos quatro tipos de *range extenders* apresenta vantagens e desvantagens face aos restantes [16].



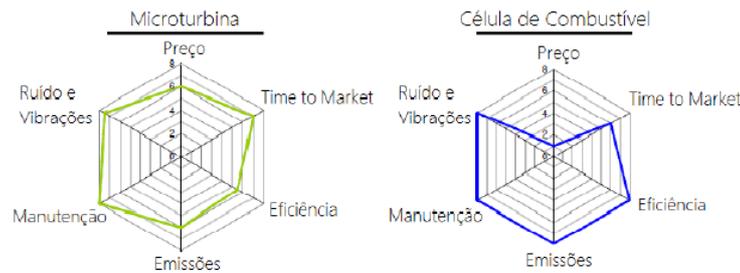


Figura 14 – Classificação dos 4 tipos de Range Extender em relação a várias características (Preço, *Time-to-market*, Eficiência, Emissões, Manutenção, Ruído e Vibrações) [16].

Pela análise da figura anterior verifica-se que a utilização de motores do tipo Wankel pode vir a ser a solução mais económica, enquanto recorrer a células de combustível torna-se uma opção mais dispendiosa.

O estudo do *time-to-market* (tempo que vai desde a conceção da ideia até à entrada do produto no mercado), revela que os motores de combustão com pistões são os mais vantajosos. Atualmente, alguns construtores recorrem a motores de combustão rotativos. Já a aplicação de microturbinas e células de combustível ainda se encontra com menos adesão. No entanto, existem já veículos que utilizam este tipo de tecnologia, estando previsto o lançamento de outros veículos num futuro próximo.

No que respeita à eficiência, e em concreto à das células de combustível, é possível notar que são a solução que apresenta melhores resultados, contrastando com o fator preço anteriormente visto. A utilização de microturbinas e motores do tipo rotativo possibilita baixas eficiências em comparação com as restantes opções, pelo que se revelam soluções menos eficientes.

A tecnologia de extensores de autonomia com base em células de combustível é também, tal como a variável eficiência, a que apresenta níveis de emissões menores. Esta vantagem tem a ver com o facto das únicas emissões serem de água (H_2O). Em sentido oposto, os motores de combustão, em particular os do tipo rotativo, apresentam os piores níveis de emissões.

A manutenção é mais benéfica para as microturbinas, dado existir apenas uma peça móvel que requer manutenção. Os extensores de autonomia com base em células de combustível apresentam igual nível de vantagem em relação às restantes tecnologias. Olhando para os motores de combustão apresentam piores resultados nesta matéria, em particular os motores do tipo rotativo.

Por último, no que toca a ruídos e vibrações, as células de combustível voltam a ser a opção mais em conta, juntamente com as microturbinas, em que o uso de peças leves e altas frequências de funcionamento contribuem de forma preponderante para a vantagem obtida. Do lado contrário situam-se os motores de combustão com pistões.

Na **Figura 15** é possível visualizar a constituição de um *range extender*, bem como a integração do mesmo na estrutura de um veículo elétrico. O elemento motor considerado no sistema do extensor de autonomia contempla um motor de combustão interna, pelo facto de ser a opção mais frequentemente usada [16].

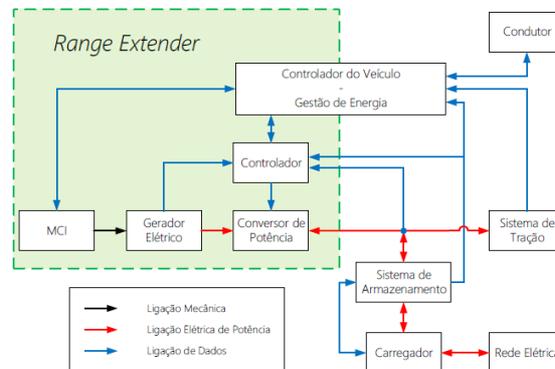


Figura 15 – Estrutura de um veículo elétrico com *range extender* [16].

No **Anexo B** encontram-se descritos os diversos tipos de motores que podem ser usados como *range extender*.

2.2 Motores elétricos

Os motores mais comuns usados em veículos elétricos são [7] [19] [20]:

- Motor de corrente contínua com escovas (CC);
- Motor de corrente contínua sem escovas (BLDC);
- Motor de indução (IM);
- Motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM);
- Motor de relutância comutada (SRM).

2.2.1. Motor de corrente contínua com escovas (CC)

Um motor CC consiste num estator, uma bobine, um rotor e um comutador com escovas, da forma que se encontra representada na **Figura 16**. A polaridade oposta entre os dois campos magnéticos no interior do motor faz com que este gire.

Estes motores estão equipados com ímanes permanentes ou enrolamentos eletromagnéticos, que produzem um campo magnético. Quando a corrente passa através da bobine, colocada entre os polos norte e sul do íman, o campo gerado interage com o campo do íman, sendo aplicado binário [21].



Figura 16 – Motor de corrente contínua com escovas [22].

Para reduzir a faísca nas escovas, os enrolamentos de compensação são utilizados em grandes motores de corrente contínua. Estes enrolamentos são colocados perto dos polos Norte (N) e Sul (S) do estator. A sua tarefa é reduzir o campo do estator no polo de comutação, do modo que se encontra presente na **Figura 17**, reduzindo assim a faísca induzida quando as escovas comutam. Como o campo principal do estator depende da amplitude e direção da corrente da bobine, esta última também é utilizada nos enrolamentos de compensação [20].

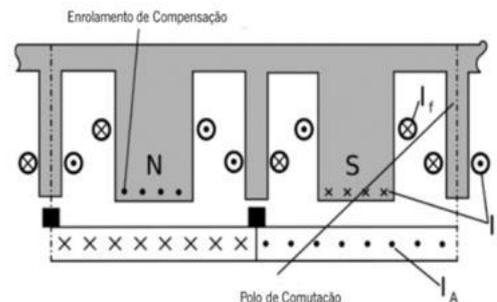


Figura 17 – Enrolamentos e polos de compensação de um motor CC excitado separadamente (adaptado de [20]).

O motor CC pode ter os enrolamentos ligados em série ou em paralelo, com o primeiro tipo a ser considerado por operar a “potência constante” e o segundo a “velocidade constante” [2].

A função do comutador é transferir corrente de um ponto estacionário para o eixo rotativo. As escovas desempenham a função de contactos elétricos no comutador, ligando a fonte de energia à bobine. Em determinados momentos durante a rotação de um motor CC, o comutador deve inverter a corrente, razão pela qual pode levar a uma diminuição da vida útil do motor devido ao desgaste que ocorre por atrito [9].

Os motores CC podem ser divididos em [20]:

- Separadamente/externamente excitados;
- Enrolamento em série;
- Motores CC de derivação ou enrolamento em paralelo.

Na **Figura 18** apresenta-se uma visão geral dos diferentes tipos de motor CC:



Figura 18 – Visão geral dos três diferentes tipos de motores CC (adaptado de [20]).

2.2.1.1. Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [20] [23]

- Razoavelmente barato;
- Fácil de controlar;
- Adaptável.

❖ Desvantagens [20] [23]

- Desgaste das escovas;
- Aumento da manutenção reduz a vida útil devido ao comutador mecânico (escovas de grafite têm de ser substituídas);
- Criação de interferências elétricas por parte das escovas.

2.2.1.2. Aplicações [20]

- Máquinas de lavar roupa;
- Ferramentas elétricas manuais;
- Compressores de ar;
- Laminadores;
- Ventiladores;
- Bombas centrífugas.

2.2.2. Motor *Brushless* DC (BLDC)

O motor BLDC (**Figura 19**) também é conhecido por ECM (*Electronically Commutated Motor*), diferenciando-se do motor anteriormente apresentado por não possuir escovas, sendo a comutação feita eletronicamente, o que elimina os problemas associados à comutação por escovas [2].

A principal diferença para os motores CC convencionais reside na forma como é feita a comutação, com esta a ser eletrónica por meio de um controlador em vez de mecanicamente por escovas. Os enrolamentos são ligados a um circuito de controlo, que fornece energia aos enrolamentos de tal forma que é gerado um campo rotativo [20].



Figura 19 – Motor *Brushless* DC [24].

O motor de corrente contínua sem escovas consiste num rotor e num estator, sendo o rotor a parte rotativa, composta por ímanes, enquanto o estator é a parte fixa, constituída por enrolamentos. Os ímanes permanentes encontram-se fixados no rotor, movendo os eletroímãs para o estator [25].

2.2.2.1. Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [19] [20] [26]

- Maior eficiência em comparação com os motores CC convencionais (com escovas);
- Maior vida útil, com menor manutenção;
- Ausência de problemas devido às faíscas com o comutador mecânico;
- Maior binário por peso do que os motores CC convencionais.

❖ Desvantagens [20] [25]

- Controlo complexo;

- Precisa de sensor de posição;
- Custo elevado.

2.2.2.2. Aplicações [20]

- Ventiladores de refrigeração de unidades centrais de processamento (CPU);
- Leitores de CD/DVD;
- Ventiladores de ar condicionado.

2.2.3. Motor de indução (IM)

O motor de indução (*Induction Motor*), vulgarmente denominado de motor CA assíncrono de indução, funciona com um campo magnético rotativo criado através de uma tensão alternada (monofásica ou trifásica) aplicada nos enrolamentos do estator (**Figura 20**). Os motores de indução são referidos como “motores assíncronos” porque funcionam a uma velocidade inferior à sua velocidade síncrona, isto é, a velocidade de rotação do rotor apresenta um ligeiro atraso comparativamente ao campo magnético girante.



Figura 20 – Motor de indução com estator e rotor [20].

Devido ao desfasamento entre a corrente de fluxo no rotor e a corrente de fluxo no estator, o rotor nunca atingirá a sua velocidade de rotação do campo magnético (ou seja, a velocidade síncrona). Esse atraso, também designado de deslizamento, será tanto maior quanto maior for a carga. Um maior deslizamento também se traduzirá num maior aumento das perdas (no rotor por efeito de Joule), o que significará um menor rendimento do motor [2] [27].

Ao ser fornecida corrente ao enrolamento do estator, é produzido um fluxo magnético no estator devido ao fluxo de corrente na bobina. O enrolamento do rotor é organizado de tal forma que cada bobina fica em curto-circuito e, de acordo com a Lei de Faraday de indução eletromagnética, a corrente começará a fluir através da bobina do rotor, o que leva a que se gere outro fluxo no rotor, com a formação

de dois fluxos, um no estator e outro no rotor. O fluxo do rotor será retardado em relação ao fluxo do estator, com a aplicação de binário no rotor, com este que a rodar na direção do campo magnético rotativo, sendo este o princípio de funcionamento dos motores de indução monofásicos e trifásicos [27].

Os tipos de motores de indução podem ser classificados consoante se trate de um motor de indução monofásico ou trifásico:

- Motor de indução monofásico [27] [28]:
 - Motor de indução de fase dividida;
 - Motor de indução de arranque de condensador;
 - Motor de indução de polo sombreado.

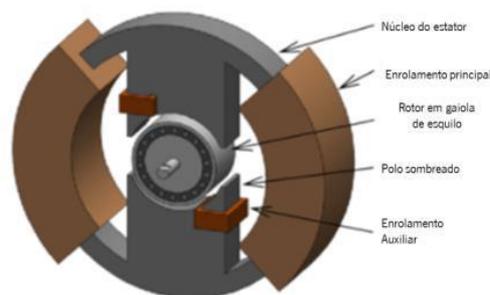


Figura 21 – Estrutura de um motor de indução de polo sombreado (adaptado de [29]).

- Motor de indução trifásico [27]:
 - Motor de indução de anel deslizante;
 - Motor de indução em gaiola de esquilo.

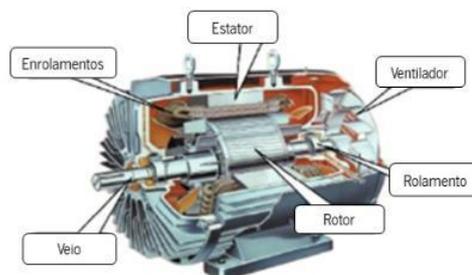


Figura 22 – Estrutura de um motor de indução em gaiola de esquilo (adaptado de [30]).

2.2.3.1. Motores de indução monofásicos

Nos motores monofásicos, o enrolamento de arranque pode ter um condensador de série e um interruptor centrífugo. Quando a tensão de alimentação é aplicada, a corrente no enrolamento principal retém a tensão de alimentação por causa da impedância do enrolamento principal, com a corrente nos cabos/fios do enrolamento de arranque e a tensão de alimentação a dependerem da impedância do mecanismo de arranque. O ângulo entre os dois enrolamentos é a diferença de fase suficiente para fornecer um campo de magnitude rotativo para produzir um binário de arranque. No instante em que o motor atinge 70% a 80% da velocidade síncrona, um interruptor centrífugo no eixo do motor abre-se e desliga o enrolamento de arranque [31].

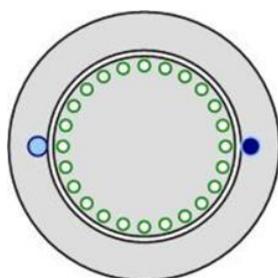


Figura 23 – Seção transversal do motor de indução monofásico [32].

Os motores de indução monofásicos têm inúmeras aplicações, donde se podem destacar: bombas, compressores, pequenos ventiladores, máquinas de furar, etc. [31].

2.2.3.2. Motores de indução trifásicos

Nos motores trifásicos, o motor é constituído pelo estator que consiste na sobreposição do enrolamento compensado por um ângulo elétrico de 120° . Quando há a ligação do enrolamento primário ou do estator a uma fonte de CA trifásica, o estator estabelece um campo magnético rotativo que gira à velocidade síncrona (ver **Figura 24**).

De acordo com a Lei de Faraday, a indução de uma f.e.m. (força eletromotriz) induzida num circuito elétrico deve-se à taxa de mudança de ligação do fluxo magnético através do circuito. Como o enrolamento do rotor num motor de indução é fechado através de uma resistência externa ou diretamente curto-circuitado pelo anel final, e corta o campo magnético rotativo do estator, uma f.e.m. é induzida na barra de cobre do rotor e devido à mesma flui uma corrente através do condutor do rotor.

No rotor, a velocidade relativa entre o fluxo rotativo e o condutor estático do rotor provoca a geração de corrente e, portanto, de acordo com a lei de Lenz, o rotor irá rodar na mesma direção para reduzir a velocidade relativa.

Assim, pelo princípio de funcionamento do motor de indução trifásico, pode-se observar que a velocidade do rotor não deve atingir a velocidade síncrona produzida pelo estator. Se as velocidades se tornassem iguais, não haveria velocidade relativa, pelo que não haveria f.e.m. induzida no rotor, nem fluxo de corrente, e, portanto, não seria gerado binário, logo o rotor não poderia atingir a velocidade síncrona [33].

As aplicações dos motores de indução trifásicos compreendem elevadores, guias, trituradores, moinhos de extração de petróleo, entre muitas outras [31].

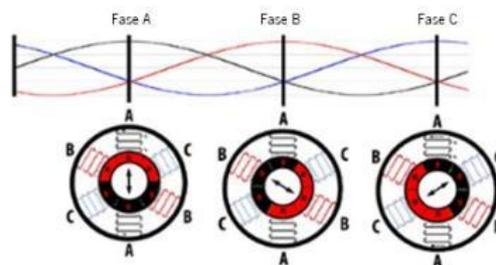


Figura 24 – Princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico (adaptado de [33]).

2.2.3.3. Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [22] [34]

- Construção bastante simples;
- Bom fator de potência (0.75 a 0.9);
- Controlo fácil;
- Baixa manutenção;
- Funcionamento independente das condições ambientais;
- Binário de arranque elevado, boa regulação de velocidade e razoável capacidade de sobrecarga nos motores de indução trifásicos.

❖ Desvantagens [20] [34]

- Motor de indução monofásico necessita de apoio no arranque;
- Dificil controlo da velocidade;

- Existência de correntes de pico de entrada elevadas que provocam redução da tensão no arranque do motor;
- Baixa eficiência em comparação com o motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM), dado o fluxo do motor ser gerado pela excitação dos enrolamentos (sem ímanes).

2.2.3.4. Aplicações [20]

- Bombas;
- Ventiladores;
- Comboios;
- Automação em geral.

2.2.4. Motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM)

Os motores síncronos de ímanes permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) podem ser divididos em motores com ímanes salientes e não salientes.

Os motores PMSM podem ser classificados de acordo com o desenho do rotor como motores com os ímanes montados à superfície do rotor (**Figura 25 a**) ou em posição interior (**Figura 25 b**), com um controlo mais complexo do que os BLDC, e necessitam de um sensor de corrente por cada fase (caso sejam trifásicos) [2].

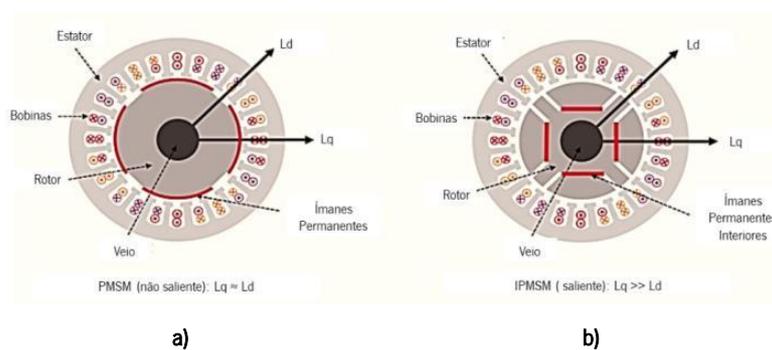


Figura 25 – Secção transversal: a) motor síncrono permanente montado à superfície não saliente (PMSM/SMPMSM), b) motor de ímanes permanentes saliente interior (IPMSM) (adaptado de [20]).

À semelhança dos motores de corrente contínua, os motores síncronos podem fornecer binário quando um campo eletromagnético rotativo e um campo constante estão parados uns em relação aos

outros. O conceito de campo magnético rotativo do estator deste tipo de motores é idêntico ao referido nos motores de indução trifásicos [35].

Para desenvolver um binário constante num motor síncrono, o campo do estator deve rodar em sincronismo com o do rotor, porque a excitação do enrolamento e o seu campo estão fixados ao rotor.

O rotor é excitado por uma fonte de alimentação CC através de anéis deslizantes (**Figura 26**) ou, mais frequentemente, por ímanes permanentes [20].

O campo magnético do rotor ao interagir com a corrente alternada síncrona dos enrolamentos do estator fornece binário, o que força o movimento do rotor.

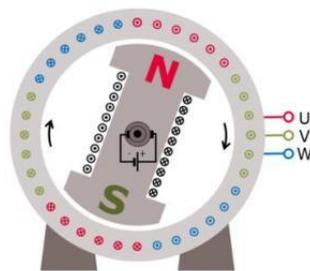


Figura 26 – Secção transversal de um motor síncrono saliente excitado externamente [20].

Os ímanes localizados no rotor criam um campo magnético constante, sendo necessária uma frequência de 50 Hz quando o motor está ligado a uma corrente trifásica, de modo a ocorrer o arranque do motor [25].

Os motores de ímanes permanentes também podem ser classificados quanto ao fluxo magnético, em algumas das configurações presentes na **Figura 27** [2].

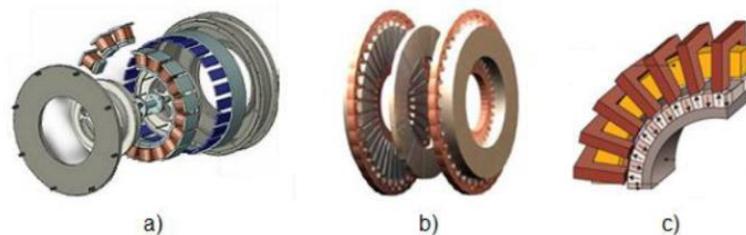


Figura 27 – Motores de ímanes permanentes: a) de fluxo radial, b) de fluxo axial, c) de fluxo transverso [2].

2.2.4.1. Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [2] [20]

- Elevado binário;
- Melhor rendimento em comparação com os motores de indução;

- Não tem os problemas de comutação associados aos motores com escovas;
- Maior relação binário/peso;
- Elevada densidade de potência (motores PMSM de fluxo axial).

❖ Desvantagens [2] [20]

- A corrente adicional para o enfraquecimento do campo diminui a eficiência a velocidades altas (comparando com os motores de indução);
- Preço (ímãs são feitos a partir de terras raras).

2.2.4.2. Aplicações [20]

- Indústrias de alta eficiência (aeroespacial, automóvel);
- Torres de refrigeração;
- Veículos híbridos;
- Sistemas de propulsão de jatos e navios.

2.2.5. Motor CA de relutância comutada (SRM)

A ideia original dos motores de relutância comutada data de 1814, contudo, estes motores foram reinventados e entraram em uso nas últimas décadas, em consonância com o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de potência. Os motores de relutância comutada têm polos salientes em ambos os rotores e estatores e atuam como uma única configuração excitada com rotores inativos (sem bobina) [2] [36].

O princípio de funcionamento do SRM (*Switched Reluctance Motor*) consiste na tendência do rotor para alcançar uma posição do estator, de modo a gerar binário. Esta tendência prende-se com o facto da indutância e o fluxo produzido pela bobina do estator serem máximos. O binário contínuo é produzido por uma sincronização de excitação de cada fase com a posição do rotor [2].

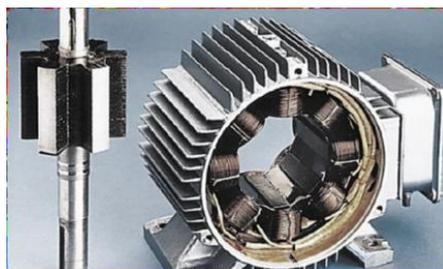


Figura 28 – Motor SRM de 3 fases, 2 pares de polos e proporção 8:6 [20].

O estator tem um sistema de enrolamento centralizado com múltiplas fases, tal como mostra a **Figura 28**. Os enrolamentos concentrados são normalmente utilizados para o estator. A relação entre o número dos dentes do estator N_s , o par de polos magnéticos p e o número das fases elétricas N_{ph} para os SRM é escrita como:

$$N_s = 2 \times p \times N_{ph} \quad (1)$$

Os motores de relutância comutada com muitas fases são escassos, uma vez que o número de fases é proporcional ao número de interruptores necessários no conversor. Um fator limitador do número de dentes mais elevado é o diâmetro da máquina, devido ao espaço necessário para os dentes [20].

O desenvolvimento deste motor possibilitou um aumento na densidade de potência, tornando o motor mais pequeno, e conseqüentemente bastante promissor para o uso em veículos elétricos. A construção do estator assemelha-se à de um motor de indução e o rotor é constituído por ferro laminado (com polos salientes) [2].

Como referido anteriormente, os SRM normalmente não têm ímanes no rotor e no estator, e, por conseguinte, desfrutam de uma estrutura simples, barata e firme. No entanto, é usada uma pequena quantidade de materiais magnéticos permanentes para melhorar o seu binário.

Os motores de relutância comutada podem ser categorizados em diferentes grupos com base nos seus padrões de movimento e trajetórias de fluxo [36].

No **Anexo C** são apresentadas as diferentes configurações dos motores de relutância comutada.

2.2.5.1. Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [2] [19] [20] [36]

- Eficiência mais elevada em comparação com os motores de indução;
- Temperatura do rotor é mais baixa em comparação com os motores de indução;

- Baixa inércia do rotor (ausência de ímanes ou enrolamentos);
- Construção fácil e sólida.

❖ **Desvantagens [2] [19] [20] [36]**

- Fator de potência inferior aos motores síncronos de ímanes permanentes (necessidade de inversor maior);
- Ruído elevado;
- Oscilações de binário elevadas;
- Interferências eletromagnéticas.

2.2.5.2. Aplicações [2] [20]

- Bombas;
- Compressores;
- Ventiladores.

2.2.6. Comparação das tecnologias de motores para veículos elétricos

De modo a obter o motor mais adequado para os veículos elétricos serão analisadas neste subcapítulo as principais características, representas na **Tabela 2**, em que são atribuídos valores de 0 a 5, sendo 0 muito mau e 5 muito bom:

Tabela 2 – Avaliação das tecnologias de motores elétricos (adaptado de [9]).

Fatores	CC	Indução	Relutância comutada	Ímanes permanentes	<i>Brushless DC</i>
Densidade de potência	2	3	3.5	4.5	5
Eficiência	2	3	3.5	4.5	5
Controlabilidade	5	4	3	4	4
Fiabilidade	3	5	5	4	4
Maturidade	5	5	4	5	4
Nível de custos	4	5	4	3	3
Nível de ruído	3	5	2	5	5
Manutenção	1	5	5	5	5
Total	25	35	30	35	35

Da análise da tabela, retira-se que as melhores tecnologias são os motores de indução, os motores de ímãs permanentes (PMSM) e os motores CC sem escovas (PM BLDC).

No entanto, além desta avaliação importa ter em conta na fase de projeto a zona típica de funcionamento do motor (**Figura 29**), que permitirá concluir qual a melhor relação de transmissão.

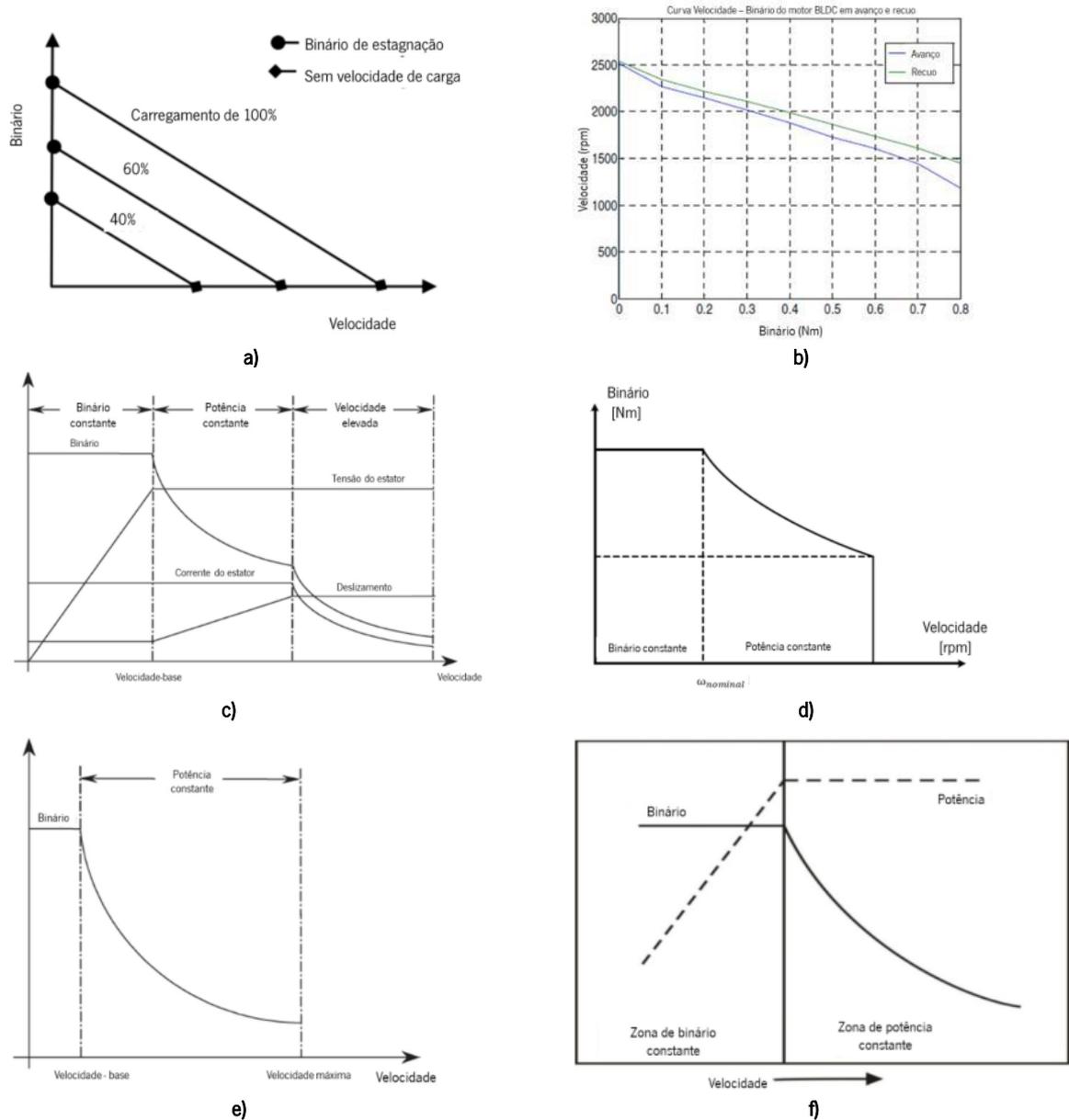


Figura 29 – Curva velocidade-binário dos motores elétricos: a) motor CC (adaptado de [37]); b) motor *Brushless* DC (adaptado de [38]); c) motor de indução (adaptado de [39]); d) motor PMSM (adaptado de [40]); e) motor SRM (adaptado de [19]); f) curva ideal (adaptado de [41]).

A partir da análise da **Tabela 3** e da **Figura 29** conclui-se que o motor de indução se adequa mais ao uso em veículos elétricos.

De seguida são apresentados alguns modelos de BEV em que são apresentados os tipos de motores elétricos existentes.

Tabela 3 – Modelos de BEV e respetivos motores eléctricos (adaptado de [9]).

Tipo de motor	Modelos BEV
DC	Fiat Panda Elettra, Citroën Berlingo Electric, Reva G-Wiz DC
SR	Chloride Lucas, Protótipo convertido da General Motors (GM), Protótipo de pequenas <i>pick-up</i>
Indução	GM EV1, BMW Mini E, Tesla Roadster, Reva G-Wiz I, Mahindra Electric E20, Verito, etc.
PMSM	Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, Ford Focus Electric, Citroën C-Zero, Peugeot iOn ED, BYD e6, Hyundai Kona e Ioniq, KIA Soul EV e Niro, MG ZS EV, etc.
PM BLDC	Smart Fortwo ED, Tuk tuk de 3 rodas eléctricos e alguns carros eléctricos chineses.

No **Anexo D** é apresentado o conceito de motor na roda, que tem sido alvo de estudos e evoluções ao longo dos anos.

2.3 Geradores

Os geradores têm como função efetuar o carregamento das baterias, auxiliar o motor eléctrico, arrancar o motor de combustão e controlar a transmissão contínua variável (CVT), nos veículos que possuem este tipo de transmissão. Há ainda a possibilidade de fornecer potência às rodas e efetuar a travagem regenerativa [42].



Figura 30 – Gerador usado em automóveis [43].

O gerador do carro é o antecessor do alternador, consistindo numa evolução tecnológica dos automóveis. A alemã Volkswagen foi a empresa que mais recorreu a este componente, principalmente nos motores refrigerados a ar. A evolução começou quando os carros passaram de um sistema eléctrico de 6 para 12 V, o que contribuiu diretamente para a evolução do gerador, bem como da sua capacidade.

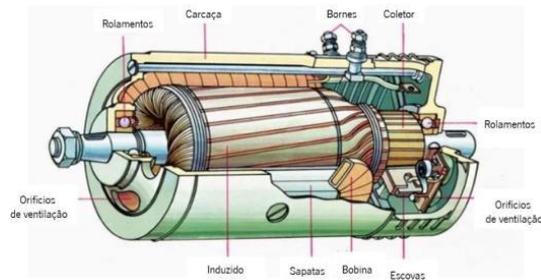


Figura 31 – Peças internas do gerador (adaptado de [43]).

As peças que compõem o gerador são as seguintes [43]:

- Escovas – são duas e maiores do que as de um alternador. Constituem o principal problema que ocorre no gerador. Quando estão gastas, a luz da bateria acende mesmo acelerando muito o motor do carro;
- Induzido – componente longo e bem diferente do induzido do motor de arranque. O objetivo é girar de forma solidária com o motor, em alta rotação, constituindo a peça principal do gerador;
- Bobinas – são duas e trabalham em volta do induzido, presas por um grande parafuso à parte interna da carcaça do gerador;
- Sapatas – duas peças de aço usadas para fixar as bobinas no gerador;
- Rolamentos – o gerador é composto por um rolamento dianteiro e outro traseiro;
- Regulador de tensão – peça externa, daí não aparecer na imagem, que consiste numa caixa elétrica com bobinas que regulam a tensão e corrente provenientes do gerador e com destino à bateria.

A potência mecânica de um gerador elétrico é normalmente obtida a partir de um eixo rotativo e é igual ao binário do eixo multiplicado pela velocidade rotativa, ou angular. A potência mecânica pode provir de várias fontes, nomeadamente [42]:

- turbinas hidráulicas em barragens ou quedas de água;
- turbinas eólicas;
- turbinas a vapor utilizando vapor produzido com o calor da combustão de combustíveis fósseis ou da fissão nuclear;

- turbinas a gás queimando gás diretamente na turbina;
- motores a gasolina e diesel.

Os geradores podem ser [42]:

- geradores síncronos;
- geradores síncronos de ímanes permanentes;
- geradores de indução ou assíncrono;
- gerador de corrente contínua.

No **Anexo E** são pormenorizados os tipos de geradores existentes.

2.4 Controladores

A necessidade de otimizar o desempenho dos motores, reduzir o consumo do combustível e reduzir as emissões de poluentes, levou à implementação de sistemas eletrónicos de ignição e injeção de combustível, controlados através de unidades de controlo [44].

O controlador do motor consiste num aparelho responsável por controlar parâmetros como a velocidade, a aceleração e em alguns casos a travagem regenerativa dos veículos elétricos. A sua atuação está centrada nos circuitos de potência e controlo, tal como é exemplificado na **Figura 32** [2].

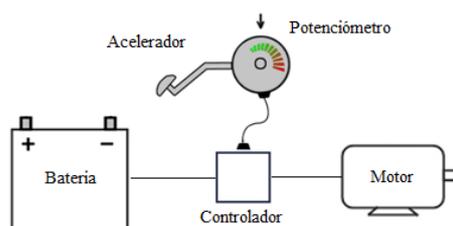


Figura 32 – Esquema do funcionamento do controlo de um veículo elétrico [2].

As ECU (*Engine Control Unit*) são constituídas por módulos internos que constituem o seu *hardware*: alimentação, acondicionamento de sinal, processamento, potência e monitorização. Na **Figura 33** é apresentado o diagrama de blocos típico de um sistema eletrónico de gestão do motor com ECU [41].

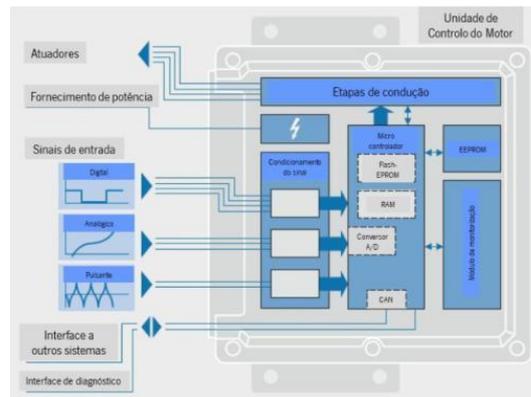


Figura 33 – Diagrama de blocos típico de uma ECU (adaptado de [44]).

O controlo do motor é feito em malha fechada (autorregulável), do modo exemplificado no diagrama de blocos da **Figura 34**. Tendo em consideração a posição do pedal do acelerador (deriva da força exercida pelo pé do condutor) e a leitura da velocidade de saída do motor, é ordenado pelo controlador que ocorra uma determinada resposta, que consiste no aumento ou diminuição de tensão e/ou corrente, de modo a obter uma determinada velocidade.

O sistema é dinâmico, uma vez que ao existir uma perturbação (o automóvel muda a inclinação ou a posição do acelerador é alterada), o sensor de rotação deteta a alteração e envia essa informação para o controlador que irá intervir, repondo a velocidade desejada, entrando assim num ciclo de controlo em malha fechada [2].

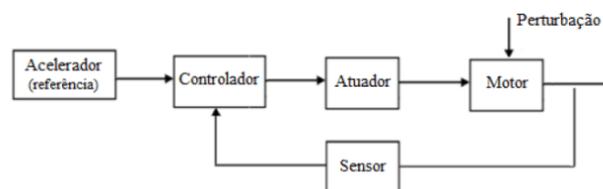


Figura 34 – Diagrama de blocos do controlo do motor em malha fechada [2].

O funcionamento das unidades de controlo deve apresentar a maior fiabilidade possível. Por se encontrarem num automóvel, estão sujeitas a temperaturas extremas, que variam entre -40°C e $+130^{\circ}\text{C}$, a vibrações mecânicas contínuas, à humidade, poeiras, entre outras adversidades. Além disso, as ECU devem manter-se em correto funcionamento em situações de bateria fraca, picos de tensão ou durante as flutuações de tensão resultantes do funcionamento do veículo/sistema. Outro requerimento de elevada importância é a compatibilidade eletromagnética que define a capacidade de o controlador ser imune a sinais de interferência de alta frequência [44].

Existem fabricantes de motores que fornecem *kits* de conversão já com o controlador incluído. Alguns exemplos são ilustrados na figura abaixo:

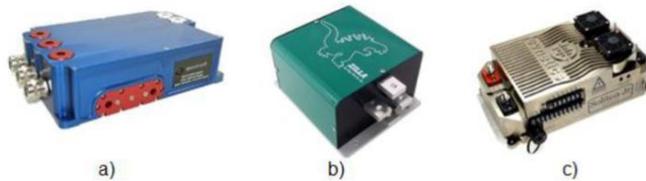


Figura 35 – Exemplos de controlados: a) Evolveit, b) Zilla, c) Evnetics [2].

2.5 Baterias

A importância das baterias para os veículos elétricos já tem vindo a ser estudada ao longo da história. O primeiro veículo elétrico foi produzido pouco depois da invenção das baterias recarregáveis de chumbo-ácido e dos motores elétricos no final do século XIX.

Nos primeiros anos do século XX, houve um período dourado dos VE's. Nessa altura, o número de veículos elétricos era quase o dobro do de carros a gasolina. No entanto, com a melhoria da fiabilidade dos MCI e o aparecimento de componentes como o motor de arranque nos anos 20 do século XX, bem como devido às limitações de peso, curtas distâncias de viagem, longo tempo de carregamento, e fraca durabilidade das baterias, levaram ao quase total desaparecimento deste tipo de veículos.

No entanto, nas últimas décadas houve um o interesse pelos VE voltou. Isto deveu-se a questões como o aumento do custo dos combustíveis, as preocupações ambientais e em especial o aparecimento e generalização de tecnologias de baterias como as baterias de íões de lítio, que permitiram aumentar a autonomia dos VE para valores viáveis.

Como requisitos, as baterias a serem implementadas na mobilidade elétrica devem incluir [11]:

- capacidade suficientemente grande para garantir uma distância de viagem considerável;
- potência máxima elevada de modo a garantir um carregamento rápido, uma boa aceleração, boa travagem regenerativa, que permitirá uma elevada eficiência energética;
- ciclo de vida que corresponda ao tempo de vida dos componentes padrão de um automóvel;
- durabilidade contra condições adversas (como, por exemplo, *stress* mecânico, *stress* climático, entre outros);
- tolerância de abuso excessivo para manter a bateria resguardada mesmo sob condições extremas (sobretensões, curto-circuitos internos e altas temperaturas).

Para fazer a ligação entre as baterias e os veículos elétricos é importante ter um bom conhecimento das tecnologias de baterias existentes. Como tal, importa compreender o conceito de bateria.

Uma bateria nada mais é do que duas ou mais células eletroquímicas juntas, que convertem energia química para energia elétrica. As células consistem em dois eletrodos, um positivo e um negativo, juntos por um componente eletrolítico, conforme se observa na **Figura 36** [11].

Com o passar dos anos, as baterias têm sofrido constantes evoluções. Contudo, a nível de preço, tamanho, densidade energética e densidade de potência ainda existem muitos entraves que têm impedido a expansão da eletrificação.

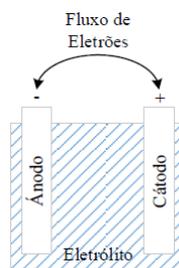


Figura 36 – Célula eletroquímica [11].

De seguida apresentam-se alguns dos parâmetros importantes na avaliação das baterias [2] [11] [45]:

- **Tensão das células:** diferença entre o potencial gerado entre as placas positivas e negativas dos eletrodos. O potencial gerado depende do material das placas, dos eletrólitos e da sua concentração. A tensão das células não é um valor constante, pois depende do estado de carga e da temperatura dos eletrólitos;
- **Tensão nominal:** resulta da multiplicação da tensão nominal de uma célula individual pelo número de células que se encontram conectadas em série na mesma;
- **Tensão em circuito aberto:** corresponde à tensão da bateria sem carga. Após um processo de carga ou descarga, o valor da tensão em circuito aberto muda, devido à polarização e a efeitos de difusão. Com a estabilização da tensão em circuito aberto, é possível medir aquilo que se chama de tensão em circuito aberto em estado estável;
- **Autodescarga:** descarregamento da bateria com o tempo, mesmo sem ser usada (expressa em % da capacidade e geralmente para 1 mês). A taxa de autodescarga pode aumentar com o aumento de temperatura, com a idade da bateria e com a humidade;
- **“Efeito memória”:** diminuição da capacidade de retenção de carga, designada no dia-a-dia

por “viciação da bateria”, que altera a percentagem de armazenamento da bateria;

- **Energia específica e densidade de energia:** a energia específica relaciona a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar com a massa dessa bateria e é expressa em kWh/kg. A densidade de energia é uma relação semelhante, mas em relação ao volume ocupado por essa bateria e é expressa em kWh/L;
- **Capacidade de uma bateria:** valor teórico de corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento a 25°C, representada por Coulomb (C). Para uma bateria com 100 Ah de capacidade descarregada à taxa de 1 C, teoricamente debita 100 A durante 1 hora, sendo que a mesma bateria descarregada à taxa de 0,5 C debita 50 A durante 2 horas;
- **SoC (*State of Charge*):** percentagem de carga que resta na bateria. Para a bateria totalmente carregada tem-se 100%, diminuindo até 0%, que corresponde à bateria completamente descarregada;
- **DoD (*Depth of Discharge*):** percentagem de energia removida da bateria, que aumenta com o descarregamento da bateria. Este parâmetro é inversamente proporcional ao tempo de vida útil que terá a bateria;
- **Número de ciclos de vida:** número de cargas e recargas que uma bateria pode efetuar até um determinado nível de descarga (normalmente 80%), sem alteração de certas características. Representa o tempo de vida de uma bateria, o que poderá ter consequências aquando da sua utilização em veículos elétricos, mais propriamente nos custos de manutenção/substituição das mesmas.

Há vários tipos de bateria que podem ser usados em VE, com algumas delas claramente a cair em desuso devido aos avanços das tecnologias mais avançadas:

- **Chumbo-Ácido (Pb-Acid)**

As baterias de chumbo-ácido (**Figura 37**) são dos sistemas de armazenamento de energia mais antigos e comuns, dada a sua robustez e baixo preço, a que se junta o facto de não terem “efeito memória”. Todavia, a sua baixa potência específica torna-os numa opção a descartar no que diz respeito à aplicação em veículos elétricos de longa distância, além de que, o facto de terem um ciclo de vida

pequeno levaria a que fosse necessário substituir o *pack* de baterias a cada dois ou três anos.

A vida destas baterias situa-se entre os 500 e os 1 000 ciclos, sendo que quanto menor for a profundidade de descarga usada, maior será a vida útil da bateria. O rendimento está dependente das taxas de carga/descarga (corrente em função do tempo), que são impostas à bateria, bem como da temperatura de funcionamento.

De realçar que durante o processo de carga de uma bateria de chumbo-ácido devem ser evitadas as cargas excessivas, dado que pode levar à emissão de hidrogénio, o que combinado com o oxigénio atmosférico resulta numa mistura altamente inflamável. É aconselhado que as cargas sejam feitas em ambiente ventilado e com carregadores, ou parâmetros de carga, indicados pelo fabricante [2][52].



Figura 37 – Bateria de Chumbo-Ácido [46].

As baterias de chumbo-ácido são aplicadas habitualmente em cadeiras de rodas, carros de golfe, iluminação de emergência e UPS (*Uninterruptible Power Supply*) [11].

- **Níquel-Cádmio (Ni-Cd)**

As baterias de níquel-cádmio (**Figura 38**) já foram consideradas umas das principais concorrentes às baterias de chumbo-ácido para a mobilidade elétrica, possuindo praticamente o dobro da energia específica comparativamente a estas. Além disso, incluem alta potência específica, um número de ciclos de vida elevado, operação numa gama de temperaturas considerável, baixa taxa de descarga e bom sistema de armazenamento a longo prazo, podendo ser recarregadas até 60% da sua capacidade em cerca de 20 minutos [11].

Contudo, estas baterias têm sido substituídas pelas baterias do tipo NiMH, dado possuírem “efeito memória”, incompatível com os ciclos de carga/descarga tipicamente irregulares dos VE's. Outro inconveniente está relacionado com a presença de cádmio (metal tóxico), que obriga a uma reciclagem controlada da bateria [2].



Figura 38 – Bateria de Níquel-Cádmio [47].

As baterias de níquel-cádmio são aplicadas em ferramentas elétricas, rádios bidirecionais, aeronaves e UPS [11].

- **Hidretos metálicos de níquel (NiMH)**

As baterias de NiMH (Figura 39) surgiram como alternativa às baterias de níquel-cádmio, podendo ser aplicadas em veículos elétricos, pois fornecem mais 40% de energia específica, comparativamente a uma bateria Ni-Cd padrão, com um número de ciclos maior e sem metais tóxicos, os quais são recicláveis, tornando-a ambientalmente amigável [11].

Estas baterias são compostas por elétrodos positivos de hidróxido de níquel e elétrodos negativos feitos de ligas absorventes de hidrogénio, sendo usadas desde que, em 1970, a Philips conseguiu desenvolver propriedades absorventes do LaNi_5 [11] [46].

Atualmente recorre-se a outras ligas absorventes de hidrogénio, tais como o alumínio, magnésio, cobalto, zircónio, entre outras, o que permite uma capacidade da bateria cada vez maior [2].



Figura 39 – Bateria de Níquel-Hidreto Metálico [48].

O carregamento das baterias de NiMH deve ser efetuado de modo relativamente rápido, evitando a formação de cristais, característica de carregamentos lentos, o que provoca a diminuição do tempo de vida. Os carregadores para este tipo de baterias devem fazer a gestão entre a rapidez de carga e a temperatura máxima atingida, que deverá estar dentro dos valores admitidos pelo fabricante. O fornecimento de energia deve ser interrompido automaticamente após o total carregamento das baterias, para evitar a degradação, uma vez que este tipo de baterias não tolera bem as sobrecargas. Estas baterias têm sido muito usadas pela Toyota nos seus HEV como o Prius, devido à sua boa fiabilidade [2].

▪ Iões de Lítio (Li-Ion)

Ao serem aplicados em baterias, os íons de lítio tem-se consolidado como a tecnologia com maior popularidade utilizada não só na maioria dos aparelhos portáteis (telemóveis, computadores, etc.), bem como também nos sistemas elétricos dos VE's. Contudo, são mais caras do que as baterias referidas anteriormente e necessitam de circuitos de proteção.

Existem duas grandes tecnologias de baterias de lítio:

- baterias de lítio-Polímero (Li-Po);
- baterias de lítio-fosfato-ferro (LiFePO₄).

As baterias de lítio-polímero recorrem ao lítio metálico para o eletrodo negativo e à transição de um óxido de metal de intercalação para o positivo. Por recorrerem a lítio sólido no eletrodo negativo existem uma série de problemas nas células destas baterias, problemas estes que causam dificuldades no que diz respeito à segurança e por vezes uma diminuição no desempenho das mesmas, causada pelo fenómeno designado por passivação (formação de películas protetoras sobre a superfície de metais por imposição de correntes anódicas) dos materiais, o que relegou para segundo plano a sua aplicação.

Dentro dos vários tipos de baterias de íons de lítio, as baterias de lítio-fosfato-ferro (LiFePO₄) revelam-se mais auspiciosas, uma vez que se recorre ao fosfato como material para o cátodo, o que torna a bateria mais fiável e segura em relação aos outros materiais, na medida em que os fosfatos possuem elevada estabilidade em condições de sobrecarga ou curto-circuito e conseguem suportar altas temperaturas sem sofrer decomposição [11].

Atualmente, algumas baterias de íons de lítio exibem correntes de carga médias de cerca de 5C (cinco vezes a corrente de carga em relação à capacidade nominal), com uma resistência do ciclo elevada. Isto mostra que a recarga rápida já não constitui um problema. No entanto, as capacidades reais da bateria para veículo elétrico atingem, hoje em dia valores entre os 55 kWh e os 100 kWh [45].



Figura 40 – Bateria de íons de lítio [49].

Na **Tabela 4** são apresentadas as características básicas das baterias mencionadas anteriormente usadas em veículos elétricos.

Tabela 4 – Desempenho técnico das diferentes tecnologias de baterias utilizadas nos veículos elétricos [11].

Caraterísticas	Tipo de Bateria			
	Chumbo-Ácido	NiCd	NiMH	LiFePO ₄
Energia Específica (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Densidade de Energia (Wh/m ³)	54-95	70-90	70-90	153
Potência Específica (W/kg)	250	125	250	350
Densidade de Potência (W/m ³)	180	150	250-1000	1800
Tensão Nominal (por célula) (V)	2	1,2	1,2	3,6
Resistência Interna (mΩ)	<100 12 V <i>pack</i>	100-200 6 V <i>pack</i>	200-300 6 V <i>pack</i>	Muito baixa
Tempo de carregamento	8-16 h	1 h típico	2-4 h	2-3 h
Tolerância a Sobrecargas	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa
Auto Descarga	Baixa	Moderada Baixa	Moderada Alta	Muito baixa
Temperatura Operacional (°C)	-12 - 60	-40 - 60	-20 - 60	-20 - 60
Ciclos de Vida	800	1500	<2000	>2000

A partir da análise da tabela anterior constata-se que as baterias de íões de lítio têm características superiores às restantes baterias, no que toca à energia específica e à densidade de potência, o que permite que estas possuam menor massa e tamanho. Além disso, outras vantagens das baterias de íões de lítio incluem uma ampla gama de temperaturas de operação, capacidade de carregamento rápido, sem efeito de memória, um ciclo de vida relativamente grande e uma taxa de auto descarga baixa. Estes fatores descritos anteriormente tornam então estas baterias apelativas, explicando a razão pela qual são empregues nos produtos eletrónicos de consumo, como é o caso dos telemóveis, computadores portáteis, câmaras de vídeo, ferramentas elétricas e outros dispositivos.

Atualmente, as baterias de NiMH são bastante utilizadas, devido à maturidade da tecnologia, mas no futuro é esperado que a adoção de motores de íões de lítio cresça nos veículos elétricos, em particular nos PHEV's e nos BEV's, devido ao potencial de obtenção de energia específica e densidade de energia.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos que antecedem as simulações, nomeadamente os cálculos teóricos que estiveram por detrás dos valores considerados durante as simulações.

3.1 Modelação do desempenho do veículo

Primeiramente é necessário modelar o desempenho do veículo, ou seja, a velocidade máxima, a aceleração e a potência mecânica requerida pelo motor.

De seguida, serão apresentados os fundamentos teóricos por detrás da escolha da bateria.

Outra característica importante dos veículos elétricos que é importante prever é a sua autonomia, o que pode também pode ser modelado matematicamente. A matemática por detrás dos resultados que serão obtidos permitirá ver os efeitos da alteração de parâmetros como a capacidade total da bateria, potência máxima da bateria e do motor elétrico, entre outros aspetos, bem como avaliar a influência da massa nos consumos do veículo.

Como tal, o motor do veículo deve ter binário suficiente para vencer a resistência ao rolamento, o arrasto aerodinâmico e o declive dos percursos a que o carro se destina.

3.2 Força de tração

O primeiro passo na modelação do desempenho do veículo é obter uma equação para a força de tração necessária. Esta força é responsável por impulsionar o veículo para a frente, sendo transmitida ao solo através das rodas motrizes.

Na **Figura 41** encontra-se representado um esquema das forças atuantes num veículo. A força que impulsiona o veículo para frente (esforço de tração), deve cumprir com os seguintes objetivos [51]:

- superar a resistência ao rolamento;
- superar o arrasto aerodinâmico;
- fornecer a força necessária para superar a componente de atuação da massa do veículo a subir uma encosta;
- acelerar o veículo, se a velocidade não for constante.

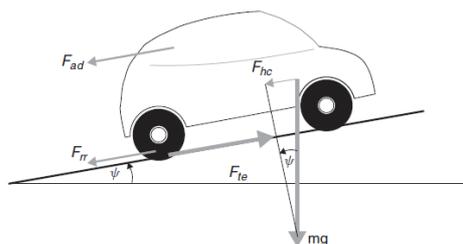


Figura 41 – Esquema das forças que atuam num veículo numa subida [52].

3.2.1. Força de resistência ao rolamento

A força F_{rr} designa-se por força de resistência ao rolamento e está diretamente associada à massa do veículo, ao tipo e pressão dos pneus, ao piso e à temperatura. O seu valor aumenta com o pavimento molhado, devido ao escoamento da água. Num plano horizontal, e a baixa velocidade é a principal força que se opõe ao rolamento do carro. A expressão que traduz a força F_{rr} é dada por [51]:

$$F_{rr} = \mu_{rr} \times m \times g \quad (2)$$

A força F_{rr} é expressa em Newton, N , o coeficiente de atrito de rolamento μ_{rr} depende do tipo de pneu, da pressão usada e da rugosidade do pavimento. O valor de μ_{rr} pode ser facilmente encontrado puxando um veículo de um ponto estável a uma velocidade muito baixa e medindo a força necessária. Os valores típicos desta variável são de 0,015 para um pneu de tela radial, até cerca 0,005 para pneus desenvolvidos especialmente para veículos elétricos [51].

Além das variáveis referidas há ainda a massa do veículo, m , expressa em kg , a aceleração da gravidade, g , em m/s^2 .

O atrito de rolamento, na literatura, é também descrito pela expressão apresentada abaixo, em que se tem em consideração a velocidade e a pressão dos pneus [60]:

$$\mu_{rr} = \frac{K}{1\,000} \left(5,1 + \frac{5,5 + 9 \times 10^{-4} \times m \times g}{p_p} \right) + \frac{0,011 + 3,88 \times 10^{-7} \times m \times g}{p_p} \times v^2 \quad (3)$$

Em que:

- $K = 0,8$ para pneus radiais e $K = 1$ para pneus não radiais;
- m é a massa do veículo (kg);
- g é a aceleração da gravidade ($\approx 9,81 \, m/s^2$);
- v é a velocidade (m/s);

- p_v é a pressão dos pneus (*bar*).

3.2.2. Força de arrasto aerodinâmico

A força de arrasto aerodinâmico, F_{ad} , está diretamente relacionada com a aerodinâmica, em concreto com a resistência ao deslocamento do veículo através do ar. É função da área frontal, forma, saliências como espelhos laterais, dutos e passagens de ar, *spoilers*, entre muitos outros fatores. Embora esta força seja insignificante quando a circulação é feita a baixas velocidades, com o aumento da velocidade, o seu valor aumenta quadraticamente [51]:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times C_d \times v^2 \quad (4)$$

Em que:

- ρ é a densidade do ar ($\approx 1,25 \text{ kg/m}^3$);
- A é a área frontal do veículo (m^2);
- C_d é o coeficiente de arrasto;
- v é a velocidade (m/s).

O coeficiente de arrasto, C_d , é tido em conta no desenho dos veículos, de modo a ser o mais baixo possível. Um valor típico para uma berlina é 0,3, mas há *designs* de veículos elétricos que alcançaram valores de 0,19. Nos veículos elétricos este componente pode ser mais baixo, pois há uma maior flexibilidade na localização dos componentes principais e há uma menor necessidade de arrefecimento do veículo.

No que respeita à área frontal do veículo, este valor corresponde à área exposta do veículo quando visto de frente, tal como se apresenta a partir do limite a amarelo da **Figura 42**:



Figura 42 – Área frontal do Citroën C1 (adaptado de [61]).

3.2.3. Força de escalada

A força F_{hc} (*hill climbing force*) representa a força necessária para vencer um declive, sendo o componente da massa do veículo que atua ao longo da encosta. Esta força é expressa por [51]:

$$F_{hc} = m \times g \times \sin \psi \quad (5)$$

Em que:

- m é a massa do veículo (kg);
- g é a aceleração da gravidade ($\approx 9,81 m/s^2$);
- ψ é o ângulo que o automóvel faz com o plano horizontal ($^\circ$).

3.2.4. Força de aceleração

No caso da velocidade do veículo estar a mudar, é necessária a aplicação de uma força que não se encontra representada na **Figura 41**. Esta força irá fornecer a aceleração linear do veículo, e é dada pela conhecida equação derivada da terceira lei de Newton [51],

$$F_{la} = m \times a \quad (6)$$

Além das forças anteriormente mencionadas, é necessário ter em consideração também a força necessária (ou o binário motor correspondente) para fazer as peças giratórias girarem mais rápido. Por outras palavras, é necessário considerar a aceleração rotacional, bem como a aceleração linear. No entanto há que ter em conta o motor elétrico, devido às maiores velocidades angulares. Na **Figura 43** encontra-se esquematizada a tração de um automóvel.

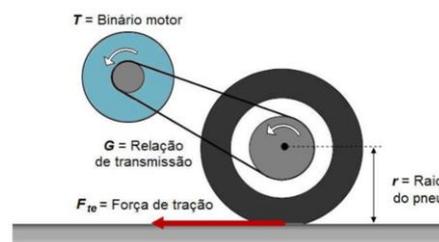


Figura 43 – Esquema da tração de um automóvel [2].

Primeiramente vai ser feita uma análise ao diâmetro do pneu, que servirá de base aos cálculos que serão realizados posteriormente. O valor deste parâmetro pode ser obtido através da marca de identificação presente no flanco do pneu, relativa às suas dimensões, apresentada segundo a forma A/B R/C . O valor A corresponde à largura da secção do pneu, em milímetros (mm), medida entre os dois

flancos, B representa a relação da secção cruzada do pneu com a respetiva largura, expressa em percentagem (%). A letra R representa o tipo de construção interna do pneu, que neste caso (e em praticamente todos os pneus de automóveis) é do tipo radial. Por fim, C é o diâmetro da jante, em polegadas ("). Há ainda a indicação do índice de carga que está relacionado com a capacidade máxima de carga (em kg) e o índice de velocidade, que é a velocidade máxima para um pneu, quando tem a pressão correta e é utilizado com carga. O índice de velocidade é indicado pela letra no fim do flanco, após o número do índice de carga [54].

A partir das informações descritas anteriormente, é possível obter a seguinte expressão (adaptado de [2]):

$$r = \frac{A}{1\,000} \times \frac{B}{100} + C \times \frac{0,0254}{2} \quad (7)$$

Para o Citroën C1, os pneus-padrão são 165/65 R14 [54], pode ser calculado o seu raio:

$$\begin{aligned} r &= \frac{165}{1\,000} \times \frac{65}{100} + 14 \times \frac{0,0254}{2} \\ &= 0,285 \text{ m} \end{aligned}$$

Pela análise da **Figura 43**, verifica-se que o binário do eixo é igual a $F_{te} \times r$, onde F_{te} é a força total de tração fornecido pelo sistema de propulsão e r é o raio do pneu. Se G é a relação de transmissão do sistema que conecta o motor ao eixo e T é o binário, então podemos dizer [52]:

$$T = \frac{F_{te} \times r}{G} \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow F_{te} = \frac{G}{r} \times T \quad (9)$$

A velocidade angular do motor, ω , em radianos por segundo ($rad\ s^{-1}$), é dada por,

$$\omega = G \times \frac{v}{r} \quad (10)$$

E, da mesma forma, a aceleração angular do motor, $\dot{\omega}$, em $rad\ s^{-2}$ é

$$\dot{\omega} = G \times \frac{a}{r} \quad (11)$$

O binário necessário para esta aceleração angular é

$$T = I \times G \times \frac{a}{r} \quad (12)$$

onde I é o momento de inércia do rotor do motor, em kg/m^2 .

A força nas rodas necessária para fornecer a aceleração angular ($F_{\omega a}$) é encontrada combinando as equações (9) e (12), das quais se obtém

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} \times I \times G \times \frac{a}{r} \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow F_{\omega a} = I \times \frac{G^2}{r^2} \times a \quad (14)$$

Nas equações anteriores assumiu-se que o sistema de engrenagens é 100% eficiente, dado o sistema ser muito simples. No entanto, nunca será 100%, pelo que se deve considerar na equação (14) a eficiência do sistema de engrenagens, η_g [51]:

$$F_{\omega a} = I \times \frac{G^2}{\eta_g \times r^2} \times a \quad (15)$$

3.2.5. Força total de tração

A força total de tração, F_{te} , é a soma de todas as forças apresentadas anteriormente

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \quad (16)$$

Da expressão acima há a ter em conta que F_{la} e $F_{\omega a}$ tomam valores negativos se o veículo estiver a reduzir a velocidade, e que F_{hc} será negativo se o veículo estiver numa descida.

3.3 Aceleração do veículo

A aceleração de um carro é um indicador-chave do seu desempenho, embora não seja usada nenhuma medida padrão. Normalmente, o tempo de travagem a 30 ou 50 km/h é dado, sendo o padrão, para veículos elétricos, os tempos de aceleração dos 0 - 30 e 0 - 50 km/h, embora esses tempos não sejam fornecidos para todos os veículos.

Estes tempos de aceleração são encontrados em simulação ou teste de veículos reais. Para veículos com motor de combustão interna, as simulações são realizadas entre valores algo após o binário máximo e após a potência máxima, ao passo que para os veículos elétricos, para velocidades mais elevadas, o motor é considerado de potência constante [50].

A velocidade angular do motor depende da relação de transmissão, G , e do raio da roda motriz, r , como foi mostrado na expressão (10). Então, pode dizer-se que

$$\text{Para } \omega < \omega_c, \text{ ou } v < \frac{r}{G} \times \omega_c, \text{ então } T = T_{max}$$

Após esta fase de binário constante, $\omega \geq \omega_c$, ou $v \geq \frac{r}{G} \times \omega_c$, então a potência é constante, como na maioria dos motores sem escova, e temos:

$$T = \frac{T_{max} \times \omega_c}{\omega} = \frac{r \times T_{max} \times \omega_c}{G \times v} \quad (17)$$

ou o binário diminui de acordo com a equação linear:

$$T = T_0 - k \times \omega \quad (18)$$

o qual, quando equação (10) é substituída pela velocidade angular, resulta em:

$$T = T_0 - \frac{k \times G}{r} \times v \quad (19)$$

Combinando as expressões acima é possível encontrar a aceleração de um veículo. Muitas destas equações podem parecer bastante complexas, mas quase todos os termos são constantes e podem ser encontrados ou estimados a partir de dados de veículos ou componentes.

Para um veículo em solo nivelado, com massa volúmica do ar de 1,25 kg/m³, a equação (16) torna-se [51]

$$F_{te} = \mu_{rr} \times m \times g + 0,625 \times A \times C_d \times v^2 + m \times a + I \times \frac{G^2}{\eta_g \times r^2} \times a \quad (20)$$

Substituindo a equação (9) por F_{te} , e como $a = \frac{dv}{dt}$, temos

$$\frac{G}{r} \times T = \mu_{rr} \times m \times g + 0,625 \times A \times C_d \times v^2 + \left(m + I \times \frac{G^2}{\eta_g \times r^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (21)$$

Anteriormente foi visto que o binário do motor, T , é uma constante ou uma simples função da velocidade (equações (17) e (19)). Portanto, a equação (21) pode ser reduzida a uma equação diferencial de primeira ordem, para a velocidade v . Assim, o valor de v pode ser encontrado para qualquer valor de t .

3.4 Dimensionamento da bateria

De forma a estimar qual a capacidade e o número de baterias necessárias, assim como a forma de serem ligadas, é necessário calcular a energia que o carro necessita para percorrer o número de quilómetros que se pretende, de forma a cumprir as premissas do projeto no que à autonomia diz respeito. A expressão é a seguinte (adaptado de [2]):

$$E_{nec} = 10 \times Cons_{méd} \times N_{km} \quad (22)$$

Em que:

- E_{nec} é a energia necessária (Wh);
- $Cons_{méd}$ é a média do consumo das viagens ($kWh/100 km$);
- N_{km} é o número de quilómetros pretendido para a autonomia.

Uma vez que a unidade de medida do consumo é $kWh/100 km$, é necessário converter para Wh/km , de modo que:

$$\frac{kWh}{100 km} = \frac{1\ 000 Wh}{100 km} = \frac{10 Wh}{km}$$

, donde resulta o daí fator 10 presente na equação.

A capacidade necessária, Cap_{nec} , varia consoante a profundidade de descarga máxima e a percentagem de autodescarga da bateria, segundo a expressão (adaptado de [2]):

$$Cap_{nec} = \frac{E_{nec}}{V_{bat} \times \frac{DoD_{máx}}{100} \times \left(\frac{100-AD_{sem}}{100}\right)} \quad (23)$$

Em que:

- Cap_{nec} é a capacidade necessária (Ah);
- E_{nec} é a energia necessária (Wh);
- V_{bat} é a tensão nominal do *pack* de baterias (V);
- $DoD_{máx}$ é a profundidade máxima de descarga (%);
- AD_{sem} é a autodescarga semanal (%).

O valor da capacidade necessária, Cap_{nec} , deve ser superior á corrente que o motor necessita durante uma hora. No caso de não se verificar o referido, o valor a ter em consideração passa a ser o que se registar.

O número de baterias em série, nS , obtém-se a partir do quociente entre a tensão do *pack* de baterias, V_{bat} , em V , e a tensão de uma bateria unitária, V_{unit} , em V .

$$nS = \frac{V_{bat}}{V_{unit}} \quad (24)$$

O número de grupos de baterias em paralelo, nP , calcula-se através da divisão entre a capacidade necessária, Cap_{nec} , em Ah , e a capacidade nominal de uma bateria, Cap_{nom} , em Ah .

$$nP = \frac{Cap_{nec}}{Cap_{nom}} \quad (25)$$

O valor de nS e nP é arredondado para o número inteiro mais próximo. Ao ser arredondado por excesso terá implicações na autonomia, uma vez que esta será maior, bem como o rendimento de descarga da bateria que será melhor. Contudo, estas vantagens acarretam um acréscimo de custo e peso do carro, ocorrendo o oposto se o arredondamento for por defeito.

O valor da autonomia é obtido sabendo a quantidade de energia armazenada no *pack* de baterias, que pode ser calculada através da equação [2]:

$$E_{bat} = V_{bat} \times Cap_{bat} \times \frac{DoD_{m\acute{a}x}}{100} \quad (26)$$

Em que:

- E_{bat} é a energia armazenada no *pack* de baterias (Wh);
- V_{bat} é a tensão nominal do *pack* de baterias (V);
- Cap_{bat} é a capacidade do *pack* de baterias (Ah);
- $DoD_{m\acute{a}x}$ é a profundidade máxima de descarga (%).

As variáveis apresentadas na expressão anterior são relativas ao *pack* de baterias, em que o fator DoD quanto maior for, menor será o tempo de vida das baterias, o que implica que é necessário haver uma análise dos prós e contras entre o armazenamento de energia e o custo da substituição das baterias.

3.5 Estimativa de consumo e autonomia

O cálculo do consumo é obtido a partir da energia necessária ao deslocamento do carro a que se subtrai a energia da regeneração. O valor da energia (em Wh) pode ser obtida através da expressão apresentada abaixo [2]:

$$E = \frac{1}{3600} \int \left(\frac{P_{motriz}}{\eta_{motriz}} - P_{regen} \times \eta_{regen} \right) dt \quad (27)$$

De realçar que tanto a potência motora como a travagem regenerativa são afetadas pelos respetivos rendimentos.

O rendimento motor engloba os rendimentos de cada um dos órgãos, desde a bateria até à roda do carro. Na **Figura 44** são mostrados os rendimentos no fluxo de energia travagem regenerativa [2]:

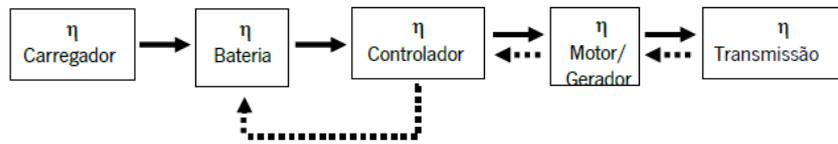


Figura 44 – Rendimentos no fluxo de energia (regeneração a traço interrompido) [2].

O consumo, em $kWh/100km$, pode ser estimado através da equação [2]:

$$Cons = \frac{(E + Cons_{access}) \times 100}{1\,000 \times S} \quad (28)$$

Em que:

- $Cons$ é o consumo ($kWh/100km$);
- E é a energia despendida (Wh);
- $Cons_{access}$ é a estimativa da média do consumo dos acessórios, tais como autorrádio, climatização, iluminação, entre outros (Wh);
- S é o percurso efetuado (km).

A estimativa do consumo torna-se complexa, uma vez que a capacidade da bateria varia de vários fatores como o rendimento da bateria, tipo de bateria, temperatura e taxa de carga ou descarga, além do próprio envelhecimento da bateria.

A variável E_{bat} provém da expressão (26). O consumo tem como unidade $kWh/100km$ e como a unidade da energia da bateria considerada foi Wh , então é feita a correção de unidades multiplicando por 0,1, a partir da seguinte relação:

$$\frac{1}{\frac{kWh}{100\ km}} = \frac{1}{\frac{1\,000\ Wh}{100\ km}} = 0,1 \frac{km}{Wh} \quad (29)$$

4. DESENVOLVIMENTO

Na fase inicial do projeto foi necessário efetuar a seleção do veículo convencional que se adequava ao projeto, tendo em conta os principais objetivos, isto é, autonomia de 100 km, com uma velocidade máxima de 100 km/h e um consumo inferior a 10 kWh/100 km. A escolha destes valores esteve relacionada com o objetivo pretendido de o veículo ser apenas para circulação urbana e suburbana (estradas nacionais), pelo que a autonomia em modo eléctrico deveria estar entre 50 e 100 km, valores estes que puderam ser conseguidos por baterias com capacidade significativamente inferior a 10 kWh.

Além do veículo foram escolhidos os componentes que serão tidos em consideração na simulação da conversão, nomeadamente o motor eléctrico, controlador do motor, caixa de velocidades, eixo de transmissão, conversor de potência CC – CC, carregador e *pack* de baterias de lítio.

4.1 Seleção do veículo

No início do trabalho foi necessário proceder à seleção de um veículo cidadão já existente no mercado, que servisse de base para a seleção dos componentes, que por sua vez iriam ser considerados nas simulações a efetuar.

Para tal chegou-se à conclusão de que o Citroën C1 era um modelo adequado ao estudo que se pretendia fazer, pelo facto de possuir dimensões ajustadas a trajetos urbanos e suburbanos, massa reduzida, além de um baixo custo de aquisição.



Figura 45 – 2ª geração do Citroën C1 (versão europeia de 2020) [55].

De seguida são apresentadas as características relativas ao modelo usado para as simulações:

Tabela 5 – Características do veículo considerado [55].

Características do veículo considerado para as simulações	
Marca	Citroën
Modelo	C1

Segmento	A (Citadinos)
Combustível	Gasolina
Motorização	998 cm ³ / 3 cilindros
Potência nominal (kW)	53 (6000 rpm)
Binário nominal (Nm)	93 Nm (4400 rpm)
Emissão de CO ₂ (g/km)	108 (WLTP)
Pneus	165/65 R14
Massa em vazio/ bruta (kg)	840/1240
Tara sem motor e transmissão (kg)	751
Coefficiente aerodinâmico	0,29
Área frontal (m ²)	2,03
Dimensões (mm)	3466 x 1615 x 1460
Distância entre eixos (mm)	2340
Velocidade máxima (km/h)	160

4.2 Seleção dos componentes

Após a seleção do veículo a usar nas simulações, procedeu-se à pesquisa de um *kit* de conversão para carro elétrico. Para tal, foram efetuadas várias pesquisas, em que se verificou que a maior oferta provém da China, onde é possível adquirir vários tipos de *kits*.

Na seleção dos componentes teve-se em conta um *kit* de conversão desenvolvido pela empresa Foshan Uni Technology Co., Ltd (**Figura 46**), sendo composto por:

- Motor elétrico;
- Controlador do motor;
- Caixa de velocidades;

- Eixo de transmissão;
- Conversor de potência CC – CC;
- Carregador;
- *Pack* de baterias de lítio.

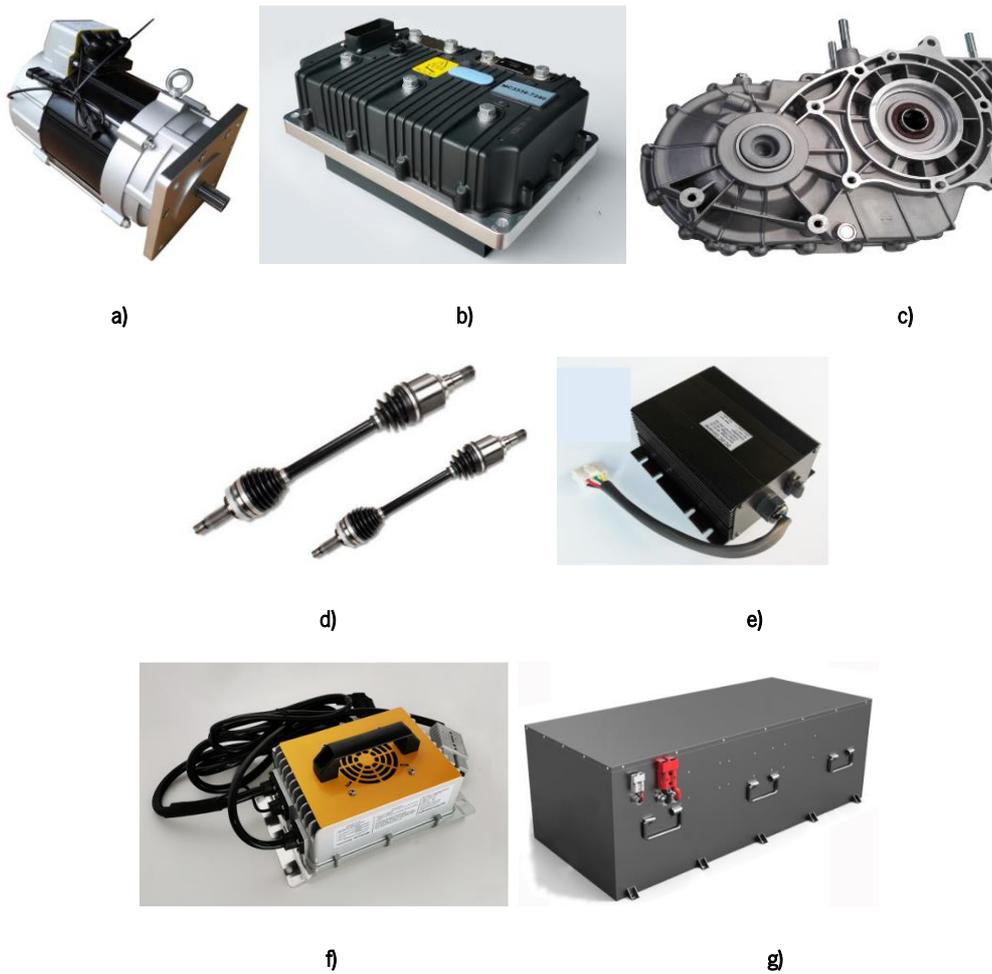


Figura 46 – a) Motor elétrico, b) Controlador do motor, c) Caixa de velocidades, d) Eixo de transmissão, e) Conversor de potência CC – CC, f) Carregador, g) *Pack* de baterias de lítio [57].

Tabela 6 – Características dos componentes do *kit* considerado [57].

Características dos componentes do <i>kit</i> considerado para as simulações	
Marca	Uni
Potência nominal (kW)	10
Potência máxima do motor elétrico (kW)	30

Tensão nominal do motor elétrico (V)	96
Binário máximo (Nm)	160
Tensão da bateria (V)	96
Capacidade da bateria (Ah)	130

No **Anexo I** encontram-se as características de cada componente que compõe o *kit* selecionado.

Selecionado o *kit* que serviu de base para as simulações, procedeu-se à pesquisa de um gerador cuja função será fornecer a energia necessária para fazer movimentar o veículo, podendo trabalhar tanto como motor ou como gerador. Para tal, optou-se por escolher o modelo presente na **Figura 47**, pois possui a potência pretendida (10 kW), além de ter valores de tensão, corrente e binário que vão de encontro ao pretendido nas premissas apresentadas no início do projeto. No **Anexo J** são apresentados os dados técnicos relativos ao gerador selecionado.



Figura 47 – Gerador síncrono trifásico de CA adotado para o modelo a incorporar nas simulações [58].

Tabela 7 – Características do gerador considerado [59].

Características do gerador considerado para as simulações	
Marca	Greef
Modelo	GDF-132M
Potência nominal (kW)	10
Tensão nominal (V)	96
Corrente nominal (A)	60,1
Binário de arranque (Nm)	0,5
Binário nominal (Nm)	32,3

Tensão da bateria (V)	96
Massa (kg)	64

Posteriormente foi efetuada uma pesquisa do motor de combustão que será acoplado ao gerador, uma vez que atualmente os *range extender* existentes no mercado ainda são escassos, possuindo poucos estudos acerca do seu funcionamento e um elevado custo. Após pesquisa e diálogo com os orientadores do projeto, decidiu-se que o modelo adotado que serviria os propósitos pretendidos seria o GX 270 da Honda (**Figura 48**). No **Anexo K** são apresentados os dados técnicos relativos ao motor.



Figura 48 – Motor Honda GX 270 [60].

Tabela 8 – Características do motor considerado [61].

Características do motor considerado para as simulações	
Marca	Honda
Modelo	GX270
Cilindrada (cm³)	270
Potência máxima de saída (kW)	6,6
Capacidade do depósito de combustível	6 l
Consumo específico de combustível	313 g/ kWh
Massa (kg)	25

5. MODELOS COMPUTACIONAIS

O trabalho prático é descrito em duas partes, em que a primeira passa por uma abordagem introdutória aos *software* usados, nomeadamente os cálculos que sustentam os valores considerados ao longo dos vários ensaios.

Na segunda parte são descritas as condições de simulação no modelo Excel. Também é descrita a utilização do *software* AVL, em concreto o módulo Cruise, com a modelação dos vários constituintes que permitiram confrontar os resultados obtidos em ambos os programas.

5.1 Modelo Excel

O modelo Excel foi desenvolvido pelo professor Francisco Brito, tendo já servido de auxílio na elaboração do artigo intitulado “*Development and Assessment of an Over-Expanded Engine to be Used as an Efficiency-Oriented Range Extender for Electric Vehicles*” [15].

O modelo Excel recebe como *input* a potência de propulsão requerida em cada instante do ciclo de condução e as características do veículo, calculando para cada instante o consumo do motor elétrico e do *range extender*, a variação do estado de carga da bateria devido ao consumo elétrico e às recargas devido à travagem regenerativa e à carga do excesso de eletricidade produzido pela bateria.

Entra em linha de conta com os rendimentos dos motores, os rendimentos de carga e descarga da bateria e os limites de potência e capacidade de cada um deles.

Implementa a estratégia de funcionamento definida, nomeadamente, valores de estado de carga onde são ativados e desativados os vários modos de funcionamento (CD, CS, EV mode).

Calcula os consumos elétricos e de gasolina para um ou vários ciclos seguidos e a autonomia elétrica no modo CD correspondente.

Este modelo tem sido utilizada para simular os parâmetros de funcionamento de diversos modelos (elétricos, híbridos, híbridos *plugin*, elétricos com extensor de autonomia), de modo a obter os valores do consumo elétrico, consumo total com adição do *range extender* e consumo exclusivo do *range extender*, para 1, 3 e 9 ciclos WLTC.

O ciclo WLTC consiste no procedimento usado atualmente para a determinação do consumo de combustível, emissões de dióxido de carbono (CO₂) e autonomia elétrica veículos ligeiros, incluindo PHEV, na Europa, para todos os veículos ligeiros que possuem motor de combustão. Também certifica o consumo elétrico de híbridos *plug-in* em determinadas circunstâncias normalizadas (com o “P” a ter

como designação “procedimento” e o “C” a significar “ciclo de condução”). O objetivo deste ciclo é certificar o consumo de combustível e emissões de CO₂, em vez do consumo elétrico de PHEV [15].

Os ciclos WLTC estão dividido em três classes (Tabela 9), de acordo com as categorias de veículos de diferentes relações potência-massa (PMR). O parâmetro PMR é definido como a relação potência nominal (W)/massa em vazio (kg).

Assim, foi necessário adaptar o ciclo de condução a três classes de veículos (classe 1, classe 2 e classe 3) de diferentes categorias de PMR. Dentro da classe WLTC 3 (PMR > 34 W/kg) existem duas versões do ciclo WLTC. Na classe 3a, a velocidade máxima é inferior a 120 km/h, enquanto na classe 3b se considera uma velocidade máxima superior a 120 km/h. A classe 2 (22 W/kg < PMR ≤ 34 W/kg) foi projetada para veículos de menor potência. Caracteriza-se igualmente por ter quatro fases de velocidade como na classe 3, mas com acelerações e velocidades máximas mais baixas em cada fase. A classe 1 (PMR ≤ 22 W/kg) deve ser aplicada a veículos com o PMR mais baixo e caracteriza-se por ter apenas as fases de baixa e média velocidade [62] [63] [64].

Tabela 9 – Características do ciclo WLTC de classe 1, 2 e 3 [62].

WLTC	Phase	Duration (s)	Stop duration (s)	Distance (km)	Idling ratio (%)	Maximum speed (km/h)	Average speed (without stop) (km/h)	Average speed (with stop) (km/h)	RPA $\left[\frac{W}{kg \cdot km}\right]$
Class 3	Low	589	156	3.09	24.8	56.5	25.7	18.9	0.2046
	Medium	433	48	4.76(4.72*)	10.6	76.6	44.5(44.1*)	39.2	0.1904
	High	455	31	7.16(7.12*)	6.4	97.4	60.8(60.5*)	56.7(56.4*)	0.1223
	Ex-High	323	7	8.25	1.5	131.3	94.0	92.0	0.1249
	WLTC	1800	242	23.27(23.19*)	12.6				
Class 2	Low	589	155	3.10	24.6	51.4	25.7	19.0	0.1605
	Medium	433	48	4.73	10.6	74.7	44.3	39.4	0.1236
	High	455	30	6.79	6.2	85.2	57.5	53.7	0.1218
	Ex-High	323	7	8.01	1.5	123.1	91.4	89.4	0.0913
	WLTC	1800	240	22.64	12.4				
Class 1	Low	589	154	3.33	24.4	49.1	27.6	20.4	0.0908
	Medium	433	48	4.76	10.6	64.4	44.6	39.6	0.0743
	WLTC	1022	202	8.09	18.4				

No ficheiro Excel foi considerado o ciclo WLTC da classe 3a, pois era o único para o qual existiam dados de potência de tração requerida ao longo do ciclo. No entanto, o ciclo WLTP inclui disposições especiais para testes de várias categorias de veículos híbridos-elétricos e elétricos [65]:

- OVC-HEV's (veículos elétricos híbridos carregáveis fora do veículo);
- NOVC-HEV (veículos elétricos híbridos não carregáveis fora do veículo);
- PEV (veículos elétricos puros).

Todos os OVC-HEV's, NOVC-HEV's e PEV's são classificados como veículos de classe 3. As emissões e os restantes parâmetros são testados ao longo do respetivo ciclo de classe 3 (classe 3a ou classe 3b), nos modos CD (*Charge Depleting*) ou modo EV (modo de operação puramente elétrico), no qual a energia utilizada pelo sistema de tração do veículo provém unicamente do sistema de baterias e CS (*Charge*

Sustaining) quando o estado de carga das baterias atinge um determinado valor mínimo, entrando então em funcionamento o *range extender*.

No entanto, no desenvolvimento do ciclo foi considerado um ciclo WLTC mais reduzido, no qual não se considerou a fase de alta velocidade, pelo que a velocidade máxima obtida foi de 97,4 km/h, indo de encontro ao objetivo do projeto de ter uma velocidade máxima de 100 km/h. Por este motivo, o ciclo WLTC tido em conta tem uma distância de 15 km, correspondente a uma duração do ciclo de 1 500 s.

Na tabela abaixo apresentam-se os parâmetros do ciclo WLTC para as classes 3a e 3b.

Tabela 10 – Parâmetros do ciclo WLTC classes 3a e 3b [65].

Phase	Duration	Stop Duration	Distance	p_stop	v_max	v_ave w/o stops	v_ave w/ stops	a_min	a_max
	s	s							
Class 3b (v_max ≥ 120 km/h)									
Low 3	589	156	3095	26.5%	56.5	25.7	18.9	-1.47	1.47
Medium 3-2	433	48	4756	11.1%	76.6	44.5	39.5	-1.49	1.57
High 3-2	455	31	7162	6.8%	97.4	60.8	56.7	-1.49	1.58
Extra-High 3	323	7	8254	2.2%	131.3	94.0	92.0	-1.21	1.03
Total	1800	242	23266						
Class 3a (v_max < 120 km/h)									
Low 3	589	156	3095	26.5%	56.5	25.7	18.9	-1.47	1.47
Medium 3-1	433	48	4721	11.1%	76.6	44.1	39.3	-1.47	1.28
High 3-1	455	31	7124	6.8%	97.4	60.5	56.4	-1.49	1.58
Extra-High 3	323	7	8254	2.2%	131.3	94.0	92.0	-1.21	1.03
Total	1800	242	23194						

Além destes ciclos também se considera um ciclo WLTC com 25 km, correspondente ao modo CS, que entra em funcionamento quando o SoC baixa dos 20%, para o qual se obtém o consumo total com adição do *range extender* e o mesmo consumo, mas para o maior valor final do estado de carga.

O ciclo WLTC de 25 km foi considerado, dado ser a distância considerada nos ensaios para a obtenção dos consumos e emissões oficiais na Europa [15].

O cálculo das autonomias elétricas e consumos elétricos teve em conta a capacidade da bateria usada no modo CD, segundo a expressão:

$$Capacidade = \frac{Consumo \times Autonomia}{100} \quad (30)$$

O consumo de combustível oficial é uma média ponderada entre os modos CD e CS, baseado no “*Utility Factor*” (UF) [65]. Consiste num fator de ponderação do consumo de combustível oficial, sendo uma média ponderada entre os modos CD e CS. O valor de UF considerado na Europa é baseado na estatísticas de condução descritas pela norma SAE J2841 [66]. Este fator é de cerca de 0,5 para uma autonomia no modo CD a rondar os 23 km, distância semelhante à do ciclo WLTC. Se a autonomia no

modo CD for de 100 km, então UF será em torno de 90% [15]. Também é apresentada uma estimativa do consumo e das emissões oficiais de acordo com o procedimento de certificação europeu e utilizando o fator de utilidade correspondente ao modo CD. Para a determinação do valor de UF considerou-se um gráfico em se consegue estimar o valor deste fator para o ciclo WLTC, em função da autonomia em modo elétrico [67].

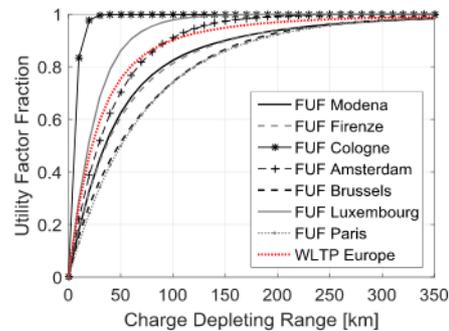


Figura 49 – Fator de utilidade (UF) usado na Alemanha em função da autonomia totalmente elétrica [65].

Ao existir uma reação química completa dos hidrocarbonetos da gasolina com o ar (uma suposição que tem em conta a combustão de hidrocarbonetos eventualmente não queimados e monóxido de carbono por parte do catalisador), então as emissões de CO₂ serão proporcionais ao consumo, nas quais existe um valor fixo de emissões de CO₂ por litro de gasolina (2,31 kgCO₂/L) de acordo com a reação química [61].

5.1.1. Descrição do modelo

O modelo Excel usado nas simulações apresenta a seguinte interface referente aos dados a introduzir:

Tabela 11 – Parâmetros de entrada do modelo Excel.

Parâmetros de entrada do modelo Excel
Capacidade total da bateria (kWh)
Capacidade total da bateria no modo CD (kWh)
Potência máxima da bateria (kW)
Potência máxima do motor elétrico (kW)
Eficiência média da bateria (%)
Potência máxima do RE no modo ECO (kW)
Potência máxima do RE no modo BOOST (kW)

Tempo mínimo de funcionamento do RE (s)
Potência máxima no modo EV em CS (kW)
Limite inferior do SoC no modo CS (%)
Nível de carga para mudar de CD para CS (%)
Histerese do SoC de CS para CD (%)
Nível de carga para mudar de CD para CS (%)
SoC inicial (%)

Assim é necessário inserir os valores de alguns parâmetros que estão relacionados com as expressões que permitem obter os valores dos consumos.

Os primeiros parâmetros a ter em consideração são:

- massa do veículo com o motor convencional;
- massa do veículo sem o motor convencional;
- massa do motor elétrico;
- massa do *range extender*, em que se considerou a massa do motor de combustão adicionado + a massa do gerador);
- massa da bateria;
- poder calorífico inferior do combustível;
- densidade do combustível.

Como alguns dos parâmetros referidos não se encontram na versão original do modelo, é necessário proceder à sua introdução.

Posto isto, definem-se os valores seguintes, referentes à bateria, ao motor elétrico e ao motor térmico, mais concretamente a capacidade, potência máxima e eficiência média da bateria, a que seguem a potência máxima e eficiência média do motor elétrico e por fim a potência e eficiência do motor + gerador que servirão de extensor de autonomia no modo ECO e BOOST e o rendimento do gerador usado no extensor de autonomia.

O RE irá operar sob duas condições fixas diferentes: modo ECO, no qual o range extender é capaz de fornecer uma potência mecânica de 6 kW às 2 750 rpm, e que se encontra na curva do motor referente à potência máxima de funcionamento recomendada e o modo BOOST, que funciona a uma potência máxima de 7 kW às 4 000 rpm. Estes dados foram obtidos das curvas do motor Honda [60].

Sempre que o RE está ligado, o modo eleito para entrar em funcionamento é o ECO, desde que seja possível satisfazer os requisitos de energia com a energia produzida exclusivamente pelo RE ou pela combinação do RE com a bateria. Se a necessidade de energia superar a combinação presente no modo ECO e a energia fornecida pela bateria, então entra em funcionamento o modo BOOST. Se a produção de energia elétrica ultrapassar a necessária, o excedente é armazenado na bateria.

Os valores referentes às eficiências do motor térmico no modo ECO e BOOST são obtidos com base no valor do consumo específico de combustível (BSFC), que consiste na quantidade de combustível usado pelo motor para realizar um trabalho útil de 1 Joule. Este consumo é dado pela expressão [68]:

$$\eta_{mot} = \frac{1\,000}{PCI \times BSFC} \quad (31)$$

Em que:

- η_{mot} é o rendimento do motor (%);
- PCI é o poder calorífico inferior do combustível (kWh/kg);
- $BSFC$ é o consumo específico de combustível (g/kWh).

Os últimos *inputs* referem-se ao tempo mínimo de funcionamento do extensor de autonomia, à potência máxima no modo elétrico, quando o veículo se encontrar no modo CS, o limite inferior do estado de carga da bateria para o modo elétrico abaixo do modo CS (em %), o nível do estado de carga da bateria para ocorrer a mudança de CD para CS, o intervalo (histerese) entre a mudança do modo CS para CD, ou seja, a diferença de carga para a qual a bateria passa do modo de sustentação de carga para o modo de esgotamento de carga. Quanto maior o valor escolhido para este parâmetro, menor será a quantidade de vezes que a bateria entrará em funcionamento. Há ainda o estado de carga para o qual ocorre a mudança para CD e o estado de carga inicial da bateria.

No **Anexo L** descrevem-se as condições de simulação do modelo considerado para efetuar os ciclos de condução WLTC.

5.2 *Software* comercial AVL Cruise

O AVL Suite trata-se de um *software* avançado de simulação que consiste num conjunto abrangente de ferramentas flexíveis e soluções interdisciplinares para o desenvolvimento do sistema de propulsão. Permite reunir todas as ferramentas necessárias para modelação, *design*, simulação e componentes de teste.

Neste projeto foi usado um dos módulos que integram o AVL Suite, designado de AVL Cruise. Este módulo é usado para simulações de desempenho, consumo de combustível e emissões de veículos em ciclos de condução. Normalmente é usado para o desenvolvimento dos componentes que transferem potência da transmissão para as rodas. Permite a modelação de todos os conceitos de veículos existentes e de protótipos.

O utilizador define a plataforma, o ciclo de condução a testar e o formato de saída, sendo fornecidos formatos de saída padronizados, nos quais são apresentados os valores exigidos dos parâmetros que compõem o veículo. O utilizador pode adicionar outros valores ou definir novos formatos de saída, selecionando os valores de saída desejados, ou seja, no *software* encontram-se presentes os valores de vários parâmetros (potência, binário, massa, temperatura, etc.) para um dado módulo (motor, gerador, bateria, etc.) definidos pelo programa no modelo-base, sendo possível ao utilizador formatar os valores presentes nos parâmetros de cada módulo.

É possível a modelação de diversos tipos de veículos (motas, carros, camiões) e ainda vários conceitos (veículos convencionais, híbridos, elétricos, células de combustível ou com vários motores) [69].

A diferença deste *software*, em comparação com o modelo Excel, além do grau de detalhe, é o facto de fazer a análise energética do carro a percorrer o ciclo. O modelo Excel apenas recebe os dados da análise energética (a potência de propulsão requerida em cada instante) e calcula as entradas e saídas de energia das baterias e motores e calcula o estado de carga resultante ao longo do tempo.

O AVL Cruise permite ainda escolher um de vários modelos para simular diferentes ciclos de condução e fluxos energéticos.

5.2.1. Modelação do veículo

O módulo AVL Cruise recorre ao *Graphical User Interface* (GUI) para permitir aos utilizadores construir os seus próprios modelos de veículos, ou editar os modelos básicos fornecidos dentro do programa AVL Cruise [67]. Na **Figura 50** é apresentado o modelo de veículo elétrico com extensor de autonomia que serviu de base às simulações feitas no programa.

Cada bloco presente na figura representa um módulo que pode ser personalizado de acordo com as especificações do utilizador. As linhas azuis mostram uma ligação mecânica entre os componentes ou "conexão de energia". As linhas vermelhas mostram uma ligação de energia elétrica. Além das ligações de energia mostradas na figura, os componentes também são conectados por meio de conexões de informação através de um concentrador de dados. O sistema de propulsão do sistema REEV (*Range Extended Electric Vehicle*) consiste principalmente na bateria de tração, motor elétrico e unidade do motor-gerador, com o desempenho a ser simulado durante a pilotagem do ciclo de condução [70].

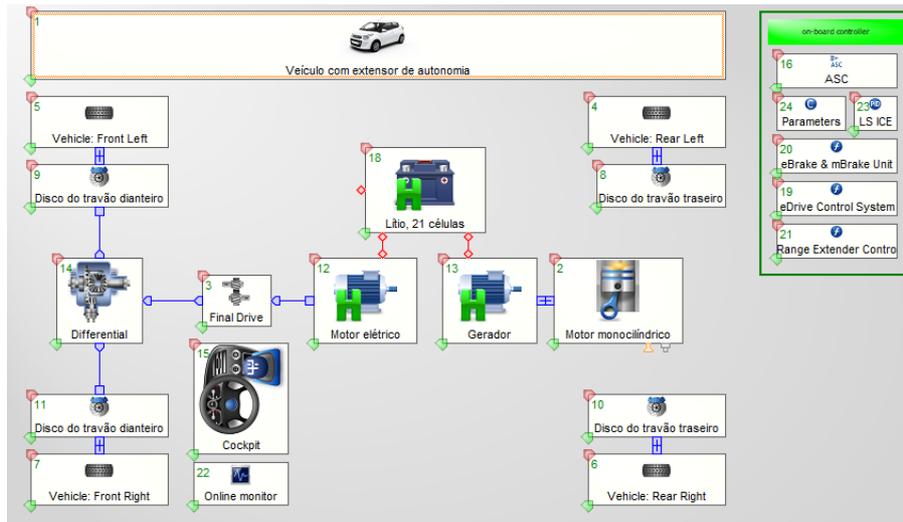


Figura 50 – Modelo de veículo elétrico com *range extender* em AVL CRUISE.

No **Anexo M** encontram-se presentes as descrições dos módulos presentes na figura acima e que serviram de base às simulações efetuadas no AVL Cruise.

6. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são detalhadas as simulações computacionais efetuadas, a partir dos dados apresentados anteriormente, bem como os resultados obtidos e a sua discussão.

6.1 Modelo Excel

O estudo abordou as seguintes variáveis:

- capacidade total da bateria (15 kWh, 12,5 kWh, 10 kWh e 7,5 kWh);
- taxa de descarga máxima da bateria (1C, 2C, 3C e 4C para cada capacidade total da bateria considerada);
- tempo mínimo de funcionamento do *range extender* (30s, 45s e 60s);
- estado de carga da bateria inicial (SoC) para 100%, 80%, 50% e 20%;
- massa do veículo (1 000 kg, 1 100 kg e 1 200 kg para as capacidades totais da bateria analisadas anteriormente).

Os parâmetros de saída do modelo são os apresentados **Tabela 12**:

Tabela 12 – Parâmetros apresentados nos resultados.

Parâmetros analisados nos ciclos WLTC
Distância (km)
Variação do SoC da bateria (%)
Variação da energia na bateria (kWh)
Consumo elétrico (kWh)
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)
K_{fuel}
Autonomia elétrica no modo CD (km)
Fator de Utilidade (UF)
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)

O parâmetro K_{fuel} representa a correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, sendo um parâmetro definido pelo fabricante. Deve ser determinado a partir de um conjunto de medições efetuadas pelo fabricante durante os testes de balanço de eletricidade.

O balanço elétrico é utilizado como uma medida da diferença do conteúdo energético da bateria do veículo no final do ciclo em relação ao início do ciclo.

Os parâmetros de entrada do modelo Excel são apresentados na **Tabela 13**:

Tabela 13 – Parâmetros de entrada das simulações das várias capacidades da bateria, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de 100%, 80%; 50% e 20% e capacidade da bateria de 7,5 kWh, 10 kWh, 12,5 kWh e 15 kWh.

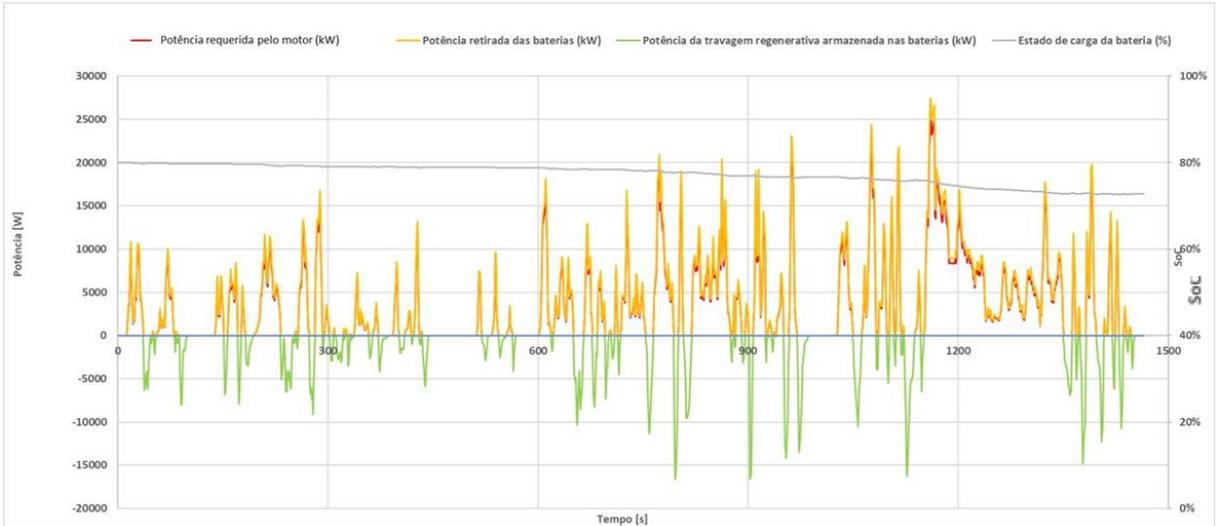
Parâmetros de entrada das simulações	
Massa do veículo com motor de combustão original (kg)	1 000
Massa do veículo sem motor de combustão original (kg)	931
Massa do motor elétrico (kg)	40
Massa do <i>range extender</i> (kg)	89
Massa da bateria (kg)	80
PCI do combustível (MJ/kg)	44
Massa volúmica do combustível (kg/m ³)	760

Nos subcapítulos seguintes serão apresentados os resultados para cada uma das variáveis, com a descrição do método que permitiu obter os resultados presente no **Anexo N**.

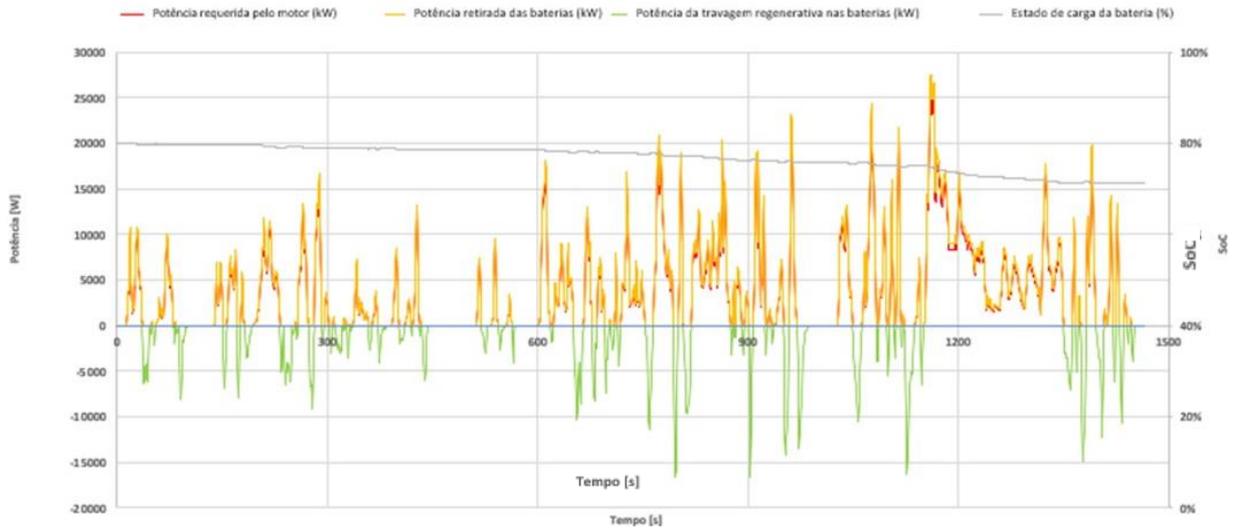
6.1.1. Capacidade total da bateria

A potência máxima da bateria considerada teve em conta uma taxa de descarga de 4C, enquanto a potência máxima do motor elétrico foi de 30 kW, correspondente ao valor máximo fornecido pelo motor elétrico do *kit* escolhido, durante um período de pico de 30s.

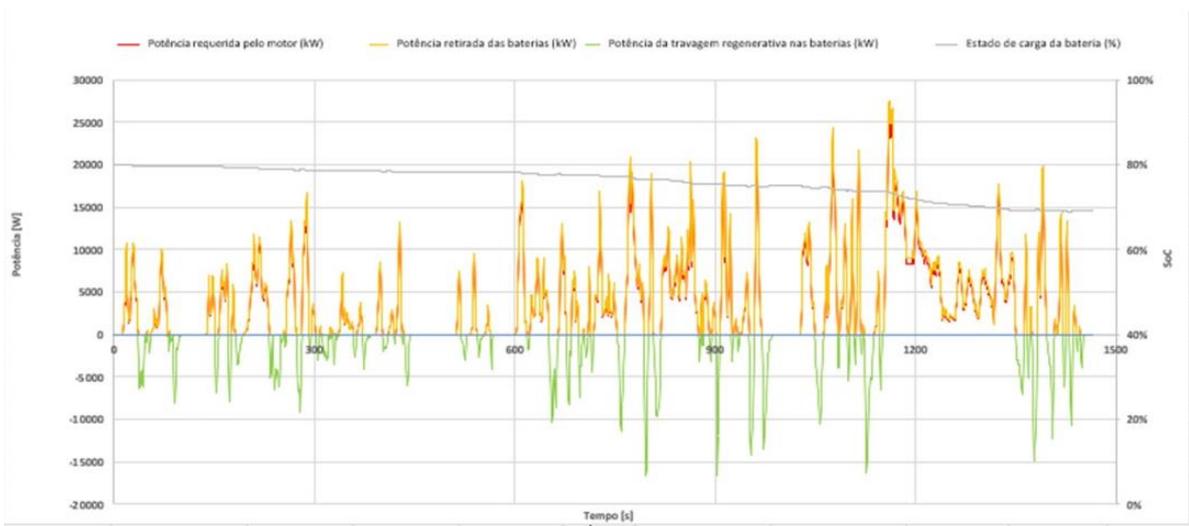
A seguir são apresentados os gráficos relativos às várias capacidades de carga para o modo CD com um SoC inicial de 80% num ciclo WLTC (**Figura 51 a**) e o modo CS a partir de um SoC de 20% no ciclo WLTC de 25 km (**Figura 51 b**).



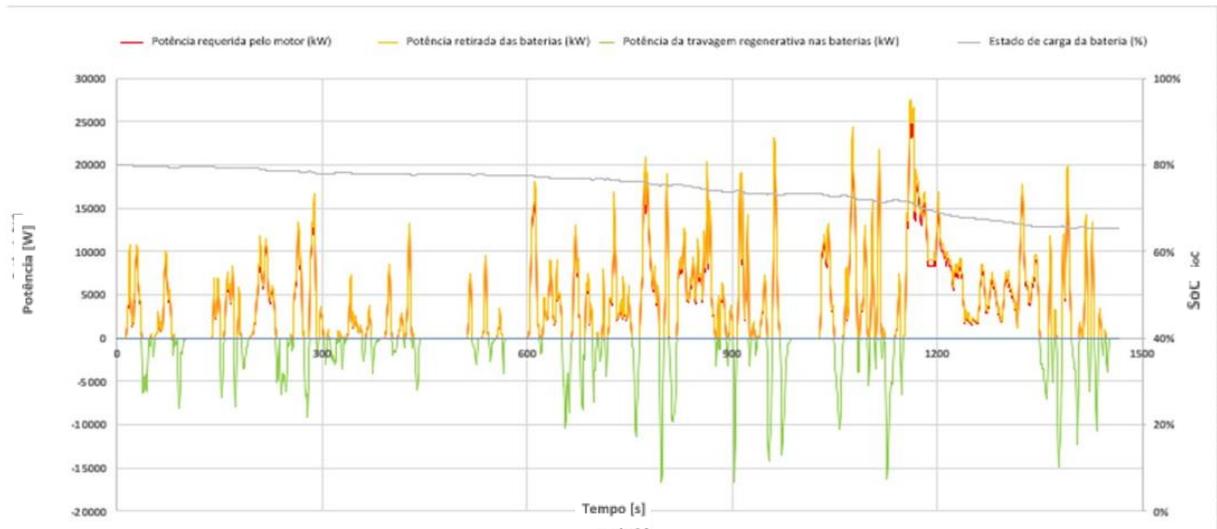
a₁) capacidade total da bateria de 15 kWh



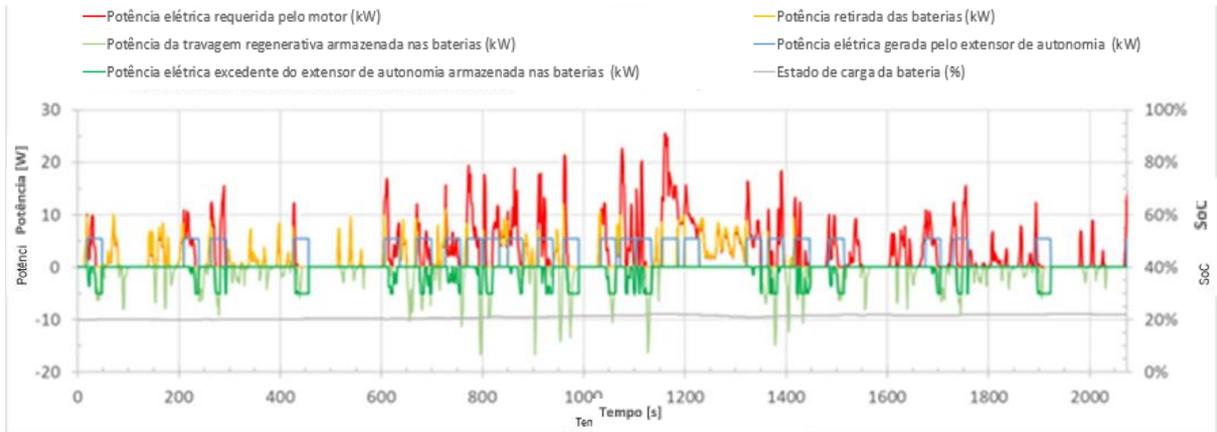
a₂) capacidade total da bateria de 12,5 kWh



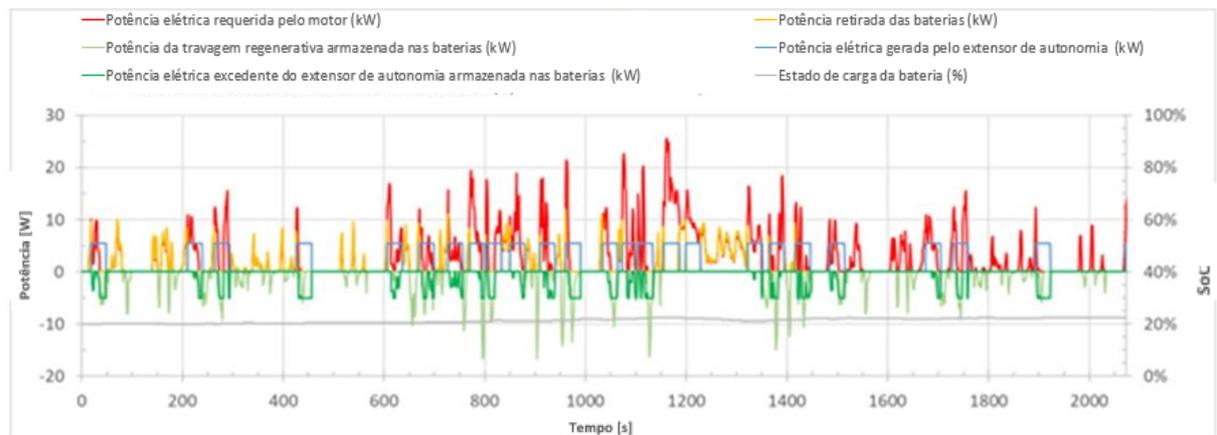
a₃) capacidade total da bateria de 10 kWh



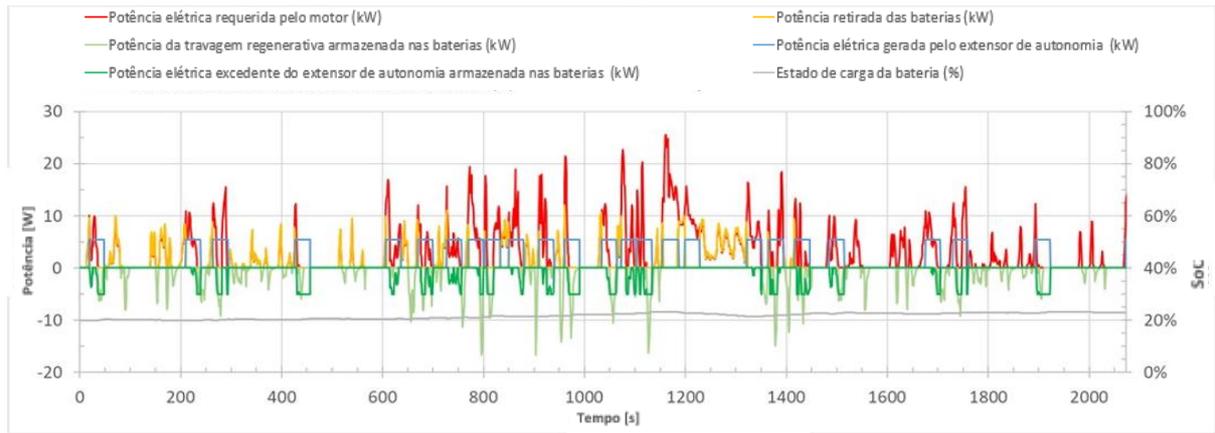
a4) capacidade total da bateria de 7,5 kWh



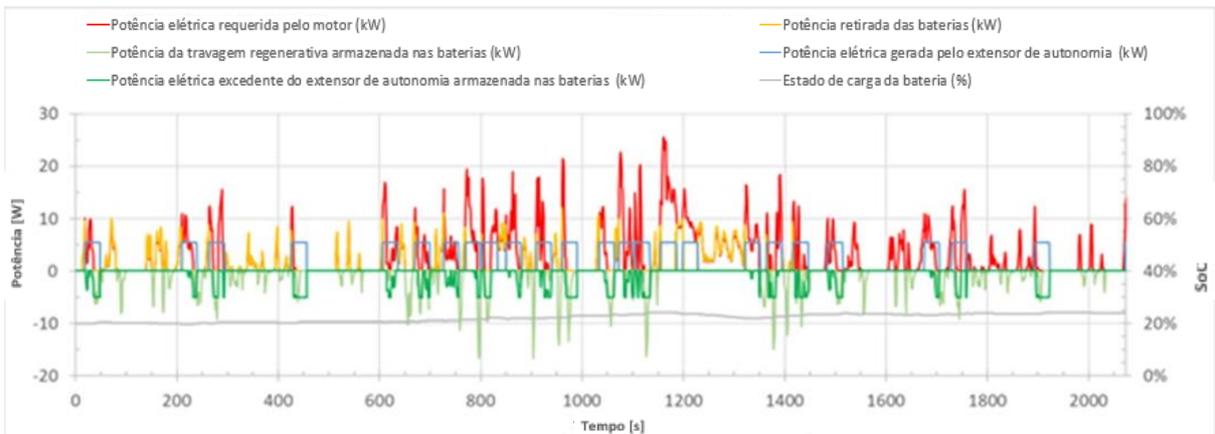
b1) capacidade total da bateria de 15 kWh



b2) capacidade total da bateria de 12,5 kWh



b₃) capacidade total da bateria de 10 kWh



b₄) capacidade total da bateria de 7,5 kWh

Figura 51 – Parâmetros de potência e estado de carga para a capacidade total da bateria de 7,5 kWh, 10 kWh, 12,5 kWh e 15 kWh e: a) modo CD, com 80% de carga inicial, sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial, para o ciclo WLTC estendido (25 km).

Os parâmetros de saída do modelo Excel são apresentados na **Tabela 14**:

Tabela 14 – Parâmetros de saída das simulações das várias capacidades da bateria, nos modos CD e CS, capacidade total da bateria de 7,5 kWh, 10 kWh, 12,5 kWh e 15 kWh e SoC inicial de 80% e 20%.

Capacidade total da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5
Capacidade total da bateria no modo CD (kWh)	12	10	8	6
Potência máxima da bateria (kW)	60	50	40	30
Potência máxima do motor elétrico (kW)	30			
Eficiência média da bateria, no modo carga/descarga (%)	90			
Potência máxima do RE no modo ECO (kW)	6			

Potência máxima do RE no modo BOOST (kW)	7	
Tempo mínimo de funcionamento do RE (s)	30	
Potência máxima no modo EV em CS (kW)	10	
Limite inferior do SoC no modo CS (%)	10	
Nível de carga para mudar de CD para CS (%)	20	
Histerese do SoC de CS para CD (%)	10	
Nível de carga para mudar de CD para CS (%)	30	
SoC inicial (%)	80	20

Os valores dos consumos obtidos são apresentados na **Tabela 15** e **Tabela 16**, nas quais se considerou um taxa de descarga máxima de 4C para cada capacidade total da bateria simulada. A folha Excel usada para as simulações permite ainda obter os parâmetros de potência e estado de carga para 1, 3 e 9 ciclos WLTC, e para o ciclo WLTC estendido (25 km).

Tabela 15 – Resultados das simulações para as capacidades total da bateria de 15 kWh, 12,5 kWh, 10 kWh e 7,5 kWh, e taxas de descarga máximas de 4C, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de: a) 80%, b) 20%.

a)					b)				
WLTC x1 (Distância de 15 km)					WLTC x1 (Distância de 15 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5	Capacidade da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5
Redução total do SoC da bateria (%)	7,3	8,7	10,9	14,6	Redução total do SoC da bateria (%)	-1,7	-2,0	-2,5	-3,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,09				Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,25			
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28				Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,70			
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00				Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45			
Autonomia elétrica no modo CD (km)	164,9	137,4	109,9	82,9	Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54			

WLTC x3 (Distância de 45 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5
Redução total do SoC da bateria (%)	21,8	26,2	32,8	43,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,28			
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28			
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			

WLTC x3 (Distância de 45 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5
Redução total do SoC da bateria (%)	-5,1	-6,1	-7,6	-2,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,76			-0,20
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,70			-0,44
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45			
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54			

WLTC x9 (Distância de 135,1 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5
Redução total do SoC da bateria (%)	58,8	55,6	51,8	53,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	8,82	6,95	5,18	4,02
Consumo elétrico (kWh/100 km)	6,53	5,15	3,83	2,98
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,19	0,59	0,93	1,19

WLTC x9 (Distância de 135,1 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5
Redução total do SoC da bateria (%)	-3,7	-5,4	-2,4	-8,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,56	-0,68	-0,24	-0,66
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,42	-0,50	-0,18	-0,49
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,13	2,15	2,07	2,15
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,56			

WLTC 25 km				
Redução total do SoC da bateria (%)	12,5	15,0	18,7	25,0
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,87			
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			
K_{fuel}	0,00			
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,00			

WLTC 25 km				
Redução total do SoC da bateria (%)	-3,7	-4,4	-5,6	-7,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,56			
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,65			
K_{fuel}	0,27			
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,49			

Tabela 16 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, para as capacidades total da bateria de 15 kWh, 12,5 kWh, 10 kWh e 7,5 kWh, potência máxima da bateria de 4 C, nos modo CS, para um SoC inicial de 20%.

Capacidade da bateria (kWh)	15	12,5	10	7,5
Fator de Utilidade (UF)	0,96	0,94	0,92	0,87
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)	0,10	0,15	0,20	0,32
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)	2,31	3,46	4,61	7,49

A operação em modo CD pode ser observada através da **Figura 51 a** para 1 ciclo WLTC. Ao longo destes ciclos, o *range extender* nunca entrou em funcionamento, pois o SoC mínimo para ativação do CS (20%) nunca foi atingido. A potência elétrica necessária pelo motor nunca excedeu a potência da bateria, razão pela qual o RE não precisou ser ligado. É possível ver que a potência descarregada nas baterias é sempre ligeiramente superior aos requisitos do motor devido à eficiência da descarga da bateria.

Os resultados das simulações encontram-se resumidos na **Tabela 15**. No modo CD, para 1 e 3 ciclos WLTC, destaca-se a manutenção do valor obtido relativo ao consumo elétrico (7,28 kWh/100 km) ao longo das várias capacidades totais da bateria, uma vez que o valor da potência máxima da bateria ao igualar a potência máxima do motor elétrico, fixada em 30 kW, tende a estabilizar o valor dos consumos. O valor de 30 kW considerado teve em conta o pico de potência atingido durante 30 s, tal como referido na descrição do *kit* considerado. Contudo, há um aumento do valor do SoC inicial-final, isto é, com a diminuição da capacidade total da bateria, há uma maior descarga da bateria (de 7,3% para 14,6% em 1 ciclo WLTC e de 21,8% para 43,7% em 3 ciclos WLTC), bem como o consumo de energia na bateria, que se manteve proporcional (1,09 kWh para 1 ciclo WLTC e 3,28 kWh para 3 ciclos WLTC). No que

respeita à autonomia elétrica no modo CD, registaram-se diferenças que variaram entre os 164,9 km para 15 kWh de capacidade e os 82,4 km para a menor capacidade total da bateria considerada (7,5 kWh).

Já para 9 ciclos WLTC, as diferenças entre as capacidades totais da bateria já se tornaram evidentes, com variações de consumo elétrico entre 6,53 kWh/100 km para 15 kWh de capacidade total da bateria e 2,98 kWh/100 km para 7,5 kWh de capacidade. No que respeita ao consumo total de combustível do RE em conjunto com a bateria, os valores deixaram de ser nulos para 9 ciclos WLTC, passando a variar entre 0,19 e 1,19 L/100 km, sendo que, como esperado, com a diminuição do consumo elétrico, aumenta o consumo do RE.

O aumento do consumo do RE e a redução do consumo elétrico não é benéfico, pois o funcionamento do RE é mais caro e produz mais emissões que o funcionamento elétrico.

Daqui se conclui que a redução do tamanho de bateria é positiva para o consumo elétrico, mas à custa de um maior consumo de gasolina, o que não é positivo.

Relativamente ao modo CS, registaram-se ganhos de energia para 1 ciclo WLTC (1,70 kWh/100 km), devido ao RE ter operado dentro dos limites de SoC compreendidos entre 20% e 30%, permitiu o aumento da capacidade da bateria. Os consumos de combustível para 1 e 3 ciclos WLTC mantiveram-se constantes, sendo de 2,45 L/100 km para o RE + bateria e 2,54 L/100 km para o RE em exclusivo.

No consumo correspondente ao ciclo de 25 km, o valor registado foi constante (2,65 L/100 km), mas de acordo com o procedimento oficial este valor precisa ser corrigido, uma vez que o SoC final foi superior ao SoC inicial [63]. Esta diferença deve-se ao facto do RE ter um funcionamento a potência constante e, portanto, há produção de excesso de energia, o que contribui para o carregamento do veículo. A correção do consumo foi feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, que utiliza o coeficiente K_{fuel} presente na **Tabela 16**, obtendo-se então um consumo corrigido de 2,49 L/100 km (ao invés de 2,65 L/100 km), a que corresponde um valor corrigido de emissões de CO₂ de 57,6 g/km.

Por fim, é apresentada uma estimativa do consumo e das emissões oficiais de acordo com o procedimento de certificação europeu e utilizando o fator de utilidade correspondente ao modo CD. Para a determinação do valor de UF considerou-se o já referido gráfico, no qual se estimou o valor de UF, a partir da autonomia WLTP [67].

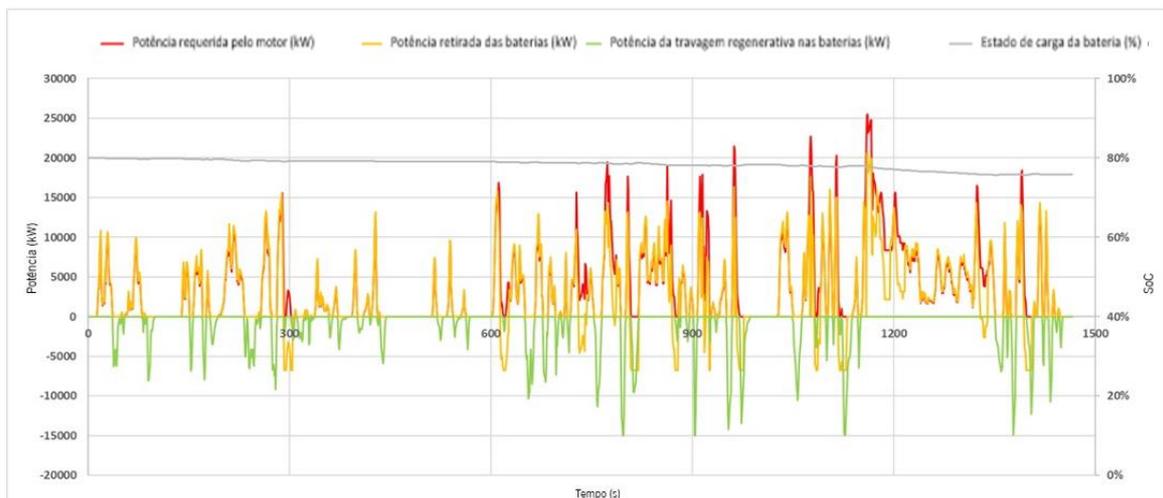
O fator de utilidade variou entre 0,96 para 15 kWh de capacidade da bateria e 0,87 para 7,5 kWh.

Tendo em conta este valor e a estimativa de consumo oficial, que variou de 0,10 a 0,32 L/100 km, obtém-se uma estimativa das emissões oficiais de CO₂ entre 2,31 e 7,49 g/km, com este valor a ser extremamente baixo quando comparado com o valor legal limite para os veículos ligeiros em geral (90 g/km).

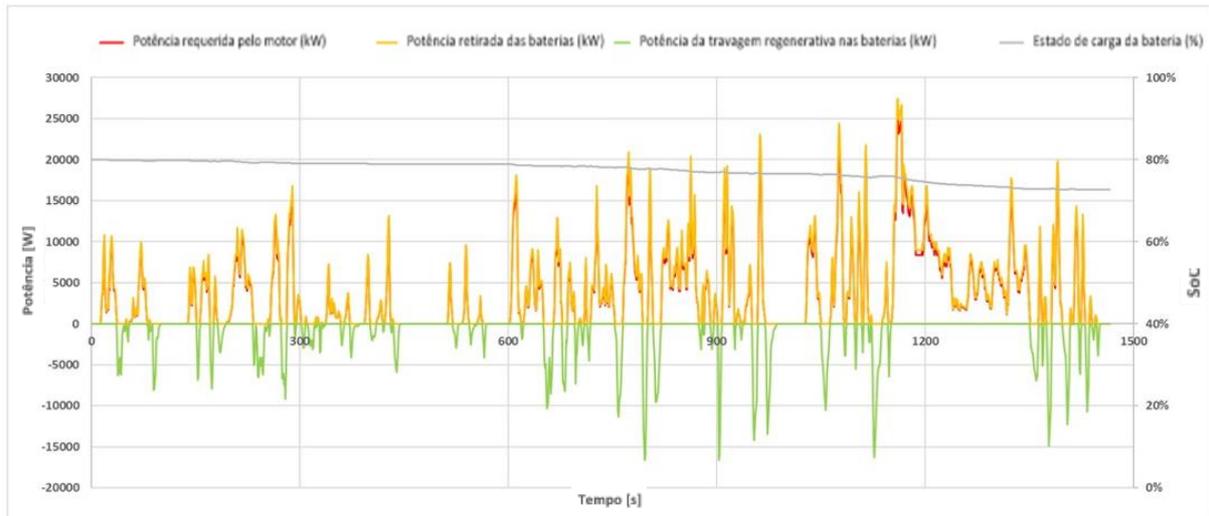
6.1.2. Potência máxima da bateria

Considerando a potência máxima da bateria, apenas se consideraram os gráficos correspondentes aos valores para as capacidades totais da bateria de 15 e 7,5 kWh, dado serem as capacidades em que ocorrem os valores mínimos e máximos dos consumos elétrico e do RE, e apenas até ser atingida a potência de pico do motor elétrico, fixada em 30 kW, o que corresponde a uma taxa de descarga máxima de 2C para 15 kWh de capacidade total da bateria e taxa de descarga máxima de 4C para 7,5 kWh de capacidade total da bateria. Para estas simulações foram ainda considerados os estados de carga inicial, fixados em 80% e 20%, tal como anteriormente.

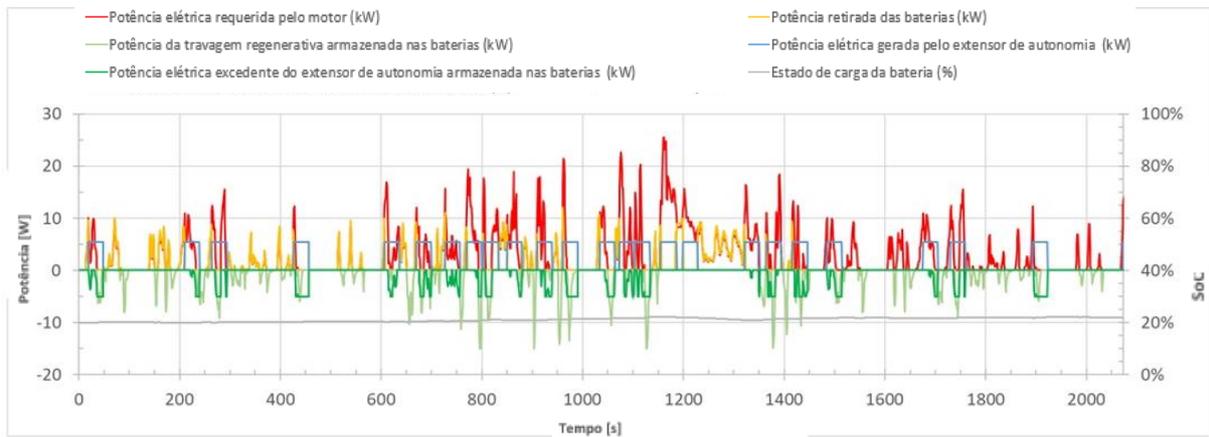
Abaixo são apresentados os gráficos relativos às potências máximas da bateria de 15 kW e 30 kW, considerando a capacidade total de 15 kWh (**Figura 52**) e potências máximas da bateria de 7,5 kW, 15 kW, 22,5 kW e 30 kW para a capacidade total de 7,5 kWh (**Figura 53**) no modo CD com um SoC inicial de 80% num ciclo WLTC e o modo CS a partir de um SoC de 20% no ciclo WLTC de 25 km.



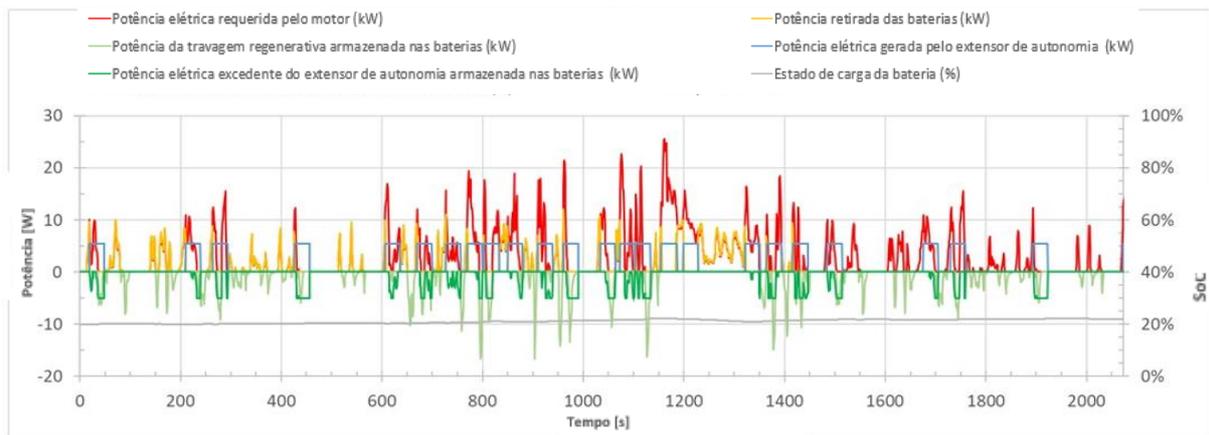
(a1) potência máxima da bateria de 15 kW



(a2) potência máxima da bateria de 30 kW

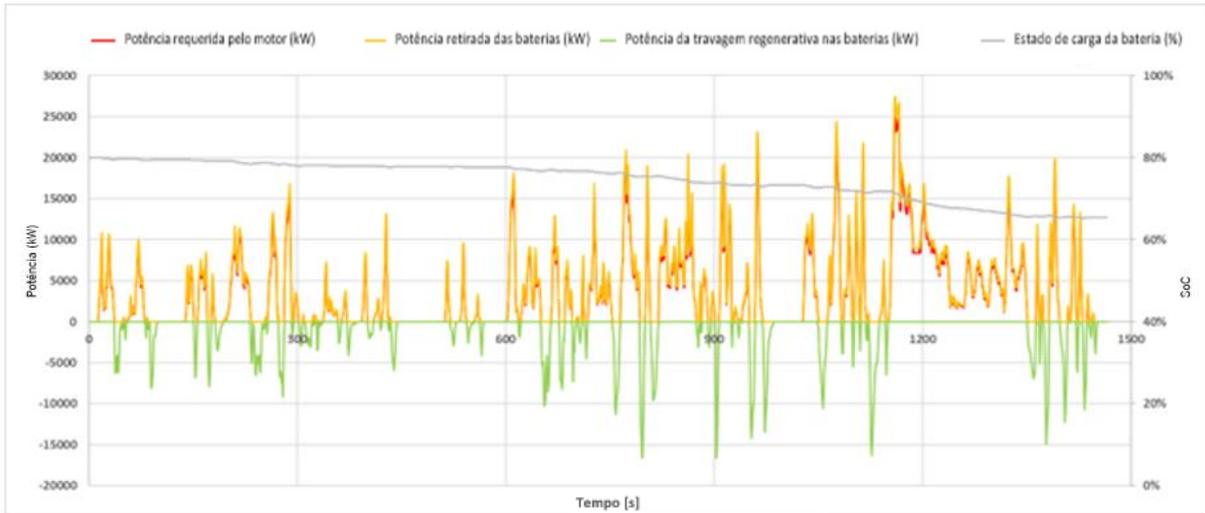


(b1) potência máxima da bateria de 15 kW

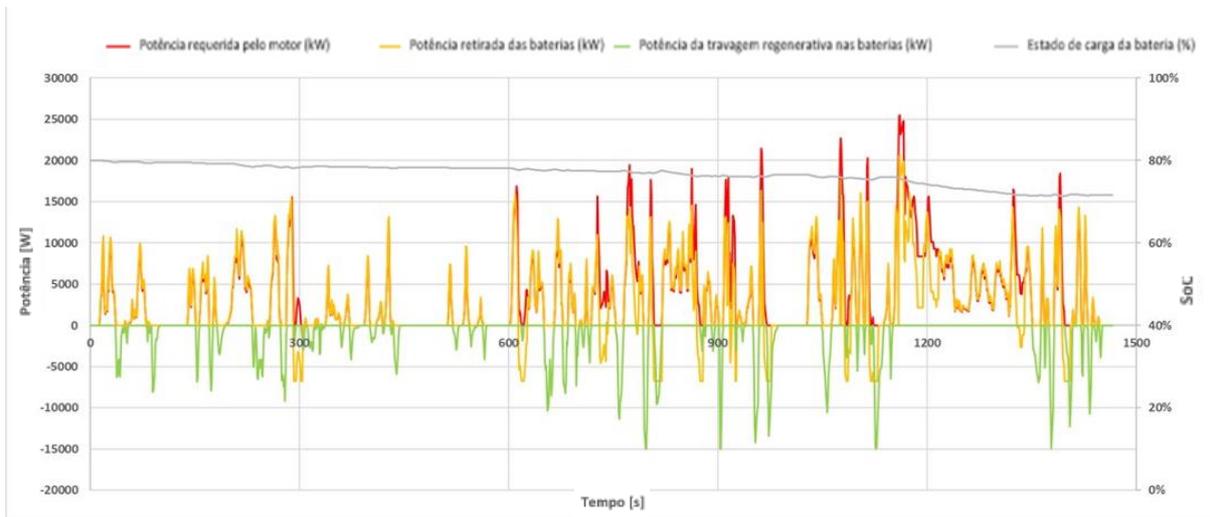


(b2) potência máxima da bateria de 30 kW

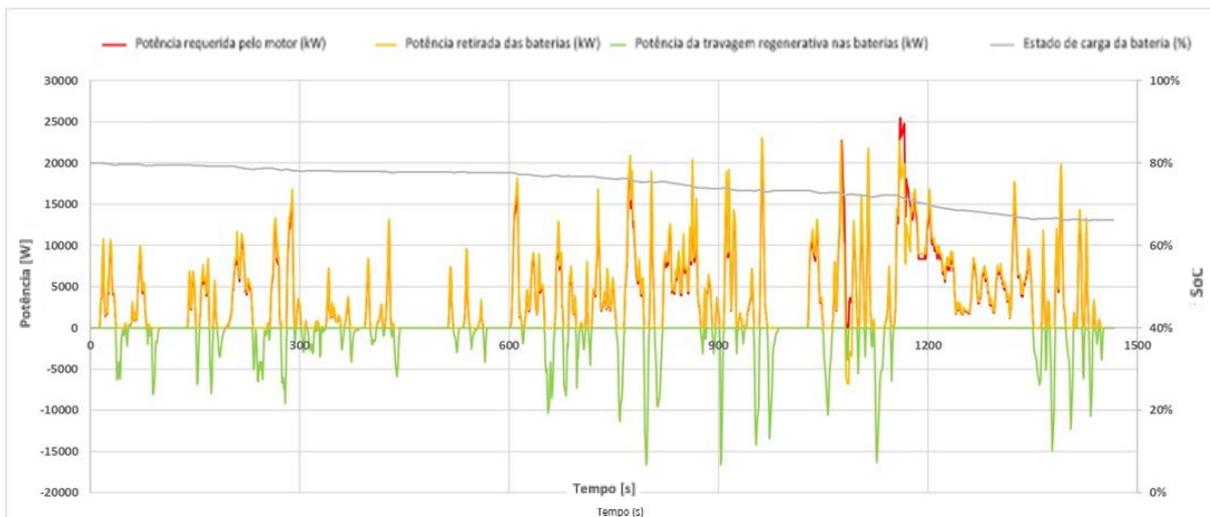
Figura 52 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes à potência máxima de bateria de 15 kW e 30 kW, para uma capacidade total da bateria de 15 kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).



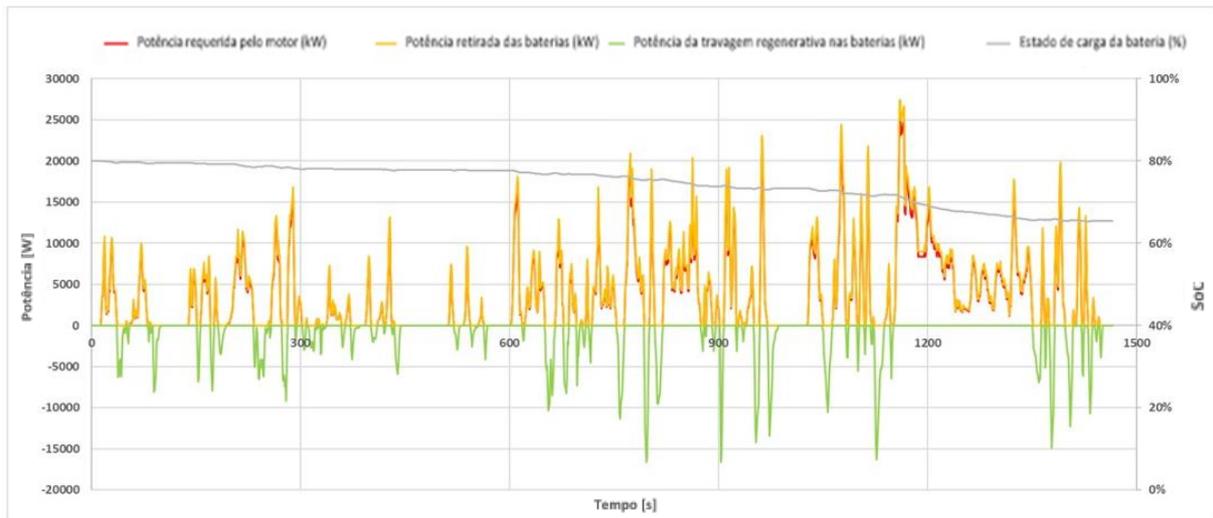
(a₁) potência máxima da bateria de 7,5 kW



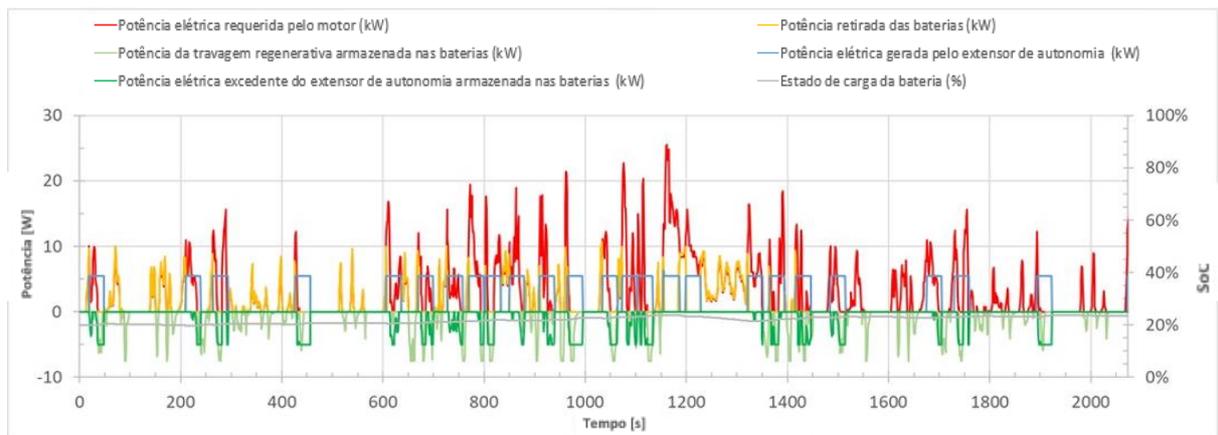
(a₂) potência máxima da bateria de 15 kW



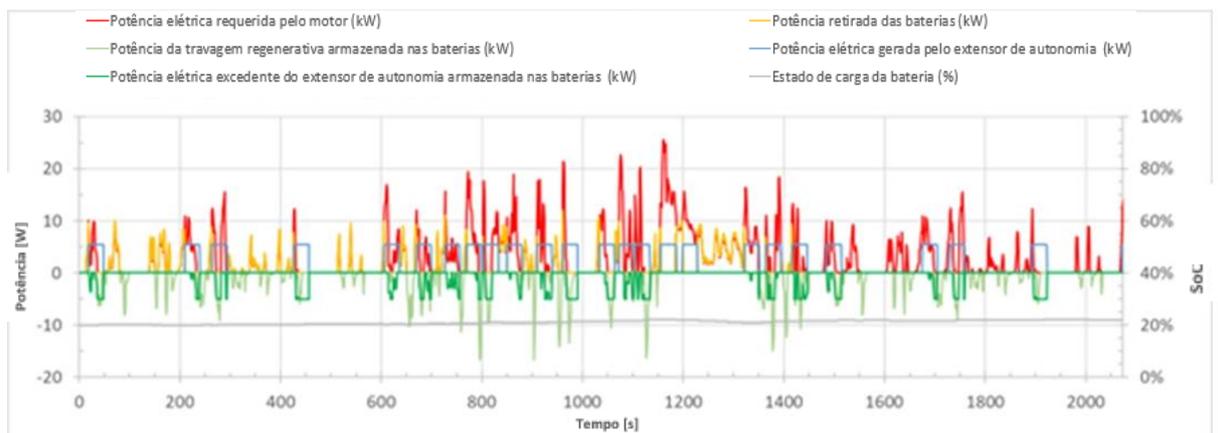
(a₃) potência máxima da bateria de 22,5 kW



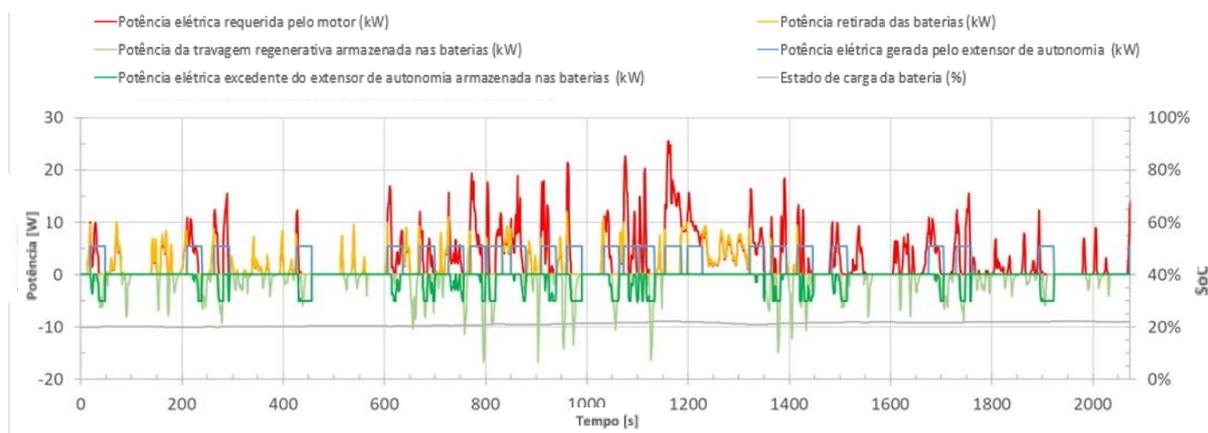
(a4) potência máxima da bateria de 30 kW



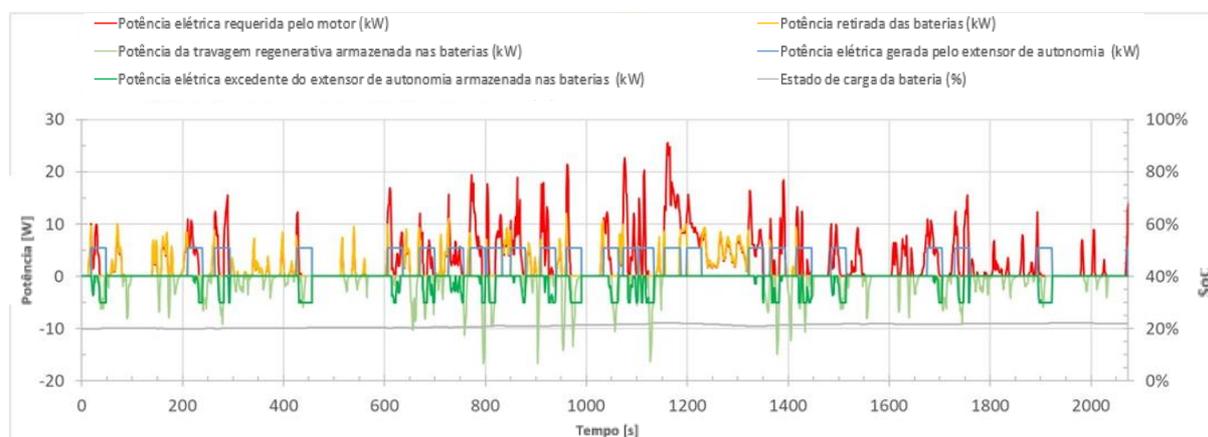
(b1) potência máxima da bateria de 7,5 kW



(b2) potência máxima da bateria de 15 kW



(b3) potência máxima da bateria de 22,5 kW



(b4) potência máxima da bateria de 30 kW

Figura 53 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes à potência máxima de bateria de 7,5 kW, 15 kW, 22,5 kW e 30 kW, para uma capacidade total da bateria de 7,5 kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).

Os valores dos consumos obtidos são apresentados nas **Tabela 17** à **Tabela 20**:

Tabela 17 – Resultados das simulações, nos modos CD e CS, para 15 kWh de capacidade, relativos à potência máxima da bateria de 15 kW e 30 kW, para um SoC inicial de: a) 80%, b) 20%.

a)

b)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 80%)		
Potência máxima da bateria (kWh)	15	30
Redução total do SoC da bateria (%)	4,2	7,3
Redução total da energia na bateria (kWh)	0,63	1,09
Consumo elétrico (kWh/100 km)	4,17	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	1,90	0,00
Autonomia elétrica no modo CD (km)	288,0	164,9

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 20%)		
Potência máxima da bateria (kWh)	15	30
Redução total do SoC da bateria (%)	-1,7	
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,25	
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,69	-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45	
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54	

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 80%)		
Potência máxima da bateria (kWh)	15	30
Redução total do SoC da bateria (%)	12,5	21,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,88	3,28
Consumo elétrico (kWh/100 km)	4,17	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	1,90	0,00

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 20%)		
Potência máxima da bateria (kWh)	15	30
Redução total do SoC da bateria (%)	-5,1	
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,76	
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,69	-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45	
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54	

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 80%)		
Potência máxima da bateria (kWh)	15	30
Redução total do SoC da bateria (%)	37,5	58,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	0,63	1,09
Consumo elétrico (kWh/100 km)	4,17	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	1,90	0,00

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 20%)		
Potência máxima da bateria (kWh)	15	30
Redução total do SoC da bateria (%)	-2,0	-3,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,30	-0,56
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,22	0,42
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,36	2,13
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,56	

WLTC 25 km		
Redução total do SoC da bateria (%)	6,9	12,5
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,04	1,87
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,02	0,00
K_{fuel}	0,21	0,00
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,23	0,00

WLTC 25 km	
Redução total do SoC da bateria (%)	-3,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,56
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,65
K_{fuel}	0,27
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,49

Tabela 18 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, para 15 kW, 12,5 kW, 10 kW e 7,5 kW de potência máxima da bateria, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de 20%.

Fator de Utilidade (UF)	0,96
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)	0,10
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)	2,31

Tabela 19 – Resultados das simulações nos modos CD e CS para 7,5 kWh de capacidade, relativos à potência máxima da bateria de 7,5 kW, 15 kW, 22,5 kW e 30 kW, para um SoC: a) 80%, b) 20%.

a)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 80%)				
Potência máxima da bateria (kWh)	7,5	15	22,5	30
Redução total do SoC da bateria (%)	0,2	8,3	13,8	14,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	0,02	0,63	1,03	1,09
Consumo elétrico (kWh/100 km)	0,12	4,17	6,88	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	4,49	1,90	0,25	0,00
Autonomia elétrica no modo CD (km)	5173,8	144,0	87,2	82,4

b)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 20%)				
Potência máxima da bateria (kWh)	7,5	15	22,5	30
Redução total do SoC da bateria (%)	-2,8	-3,4		
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,21	-0,25		
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,42	-1,70		
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45			
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54			

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 80%)

Potência máxima da bateria (kWh)	7,5	15	22,5	30
Redução total do SoC da bateria (%)	0,7	25,0	41,3	43,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	0,05	1,88	3,10	3,28
Consumo elétrico (kWh/100 km)	0,12	4,17	6,88	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	4,49	1,90	0,25	0,00

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 20%)

Potência máxima da bateria (kWh)	7,5	15	22,5	30
Redução total do SoC da bateria (%)	-8,5	-3,4		-2,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,64	-0,26		-0,20
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,42	-0,57		-0,44
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45	2,24		2,16
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54			

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 80%)				
Potência máxima da bateria (kWh)	7,5	15	22,5	30
Redução total do SoC da bateria (%)	2,1	53,2	56,3	53,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	0,05	1,88	3,10	3,28
Consumo elétrico (kWh/100 km)	0,12	4,17	6,88	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	4,49	1,90	0,25	0,00

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 20%)				
Potência máxima da bateria (kWh)	7,5	15	22,5	30
Redução total do SoC da bateria (%)	-7,3	-8,1	-8,8	
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,55	-0,60	-0,66	
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,40	-0,45	-0,49	
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	3,74	2,18	2,15	
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,56			

WLTC 25 km				
Redução total do SoC da bateria (%)	-0,2	13,9	23,4	25,0
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,01	1,04	1,75	1,87
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	4,77	2,02	0,30	0,00
K_{fuel}	0,49	0,21	0,03	0,00
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	4,76	2,23	0,36	0,00

WLTC 25 km		
Redução total do SoC da bateria (%)	-6,4	7,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	0,48	0,56
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,65	
K_{fuel}	0,27	
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,52	2,49

Tabela 20 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus, para potência máxima da bateria de 15 kW e 30 kW, nos modos CD e CS, para um SoC inicial de 20%.

Potência máxima da bateria (kWh)	7,5	15	22,5	30
Fator de Utilidade (UF)	1	0,93	0,88	0,86
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)	0,00	0,17	0,30	0,35
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)	0,00	4,03	6,92	8,07

O SoC oscilou entre 20% e 30%, em que o modo EV é reativado. Sempre que a potência ECO não é suficiente para as necessidades de energia, as baterias fornecem o restante, pelo que a potência BOOST nunca foi necessária.

Na **Figura 52 a)** e **Figura 53 a)** é possível ver que, para 1 ciclo WLTC, o *range extender* nunca entrou em funcionamento, uma vez o SoC foi sempre superior a 20%, correspondente ao valor mínimo para que o RE não entre em funcionamento. A potência elétrica necessária pelo motor manteve-se sempre abaixo da potência da bateria, que variou entre 7,5 kW e 30 kW para a capacidade total da bateria de 7,5 kWh e entre 15 kW e 30 kW para a capacidade total da bateria de 15 kWh, motivo pelo qual o RE não foi ativado. As diferenças observadas para as taxas de descarga máximas da bateria de 2C (30 kW) e 4C (30 kW), respetivamente, correspondentes às capacidades da bateria de 15 e 7,5 kWh, estão relacionadas com o estado de carga da bateria.

Na **Figura 52 b)** e **Figura 53 b)** são apresentados os resultados para o modo CS, definido para entrar em funcionamento quando o SoC cai abaixo de 20%. No ciclo WLTC de 25 km, para as potências máximas da bateria das capacidades da bateria de 15 e 7,5 kWh, mantiveram-se os períodos de funcionamento do extensor de autonomia, apenas se observando alterações do SoC da bateria, concretamente na diferença entre o SoC inicial e final, com o aumento do valor do mesmo, que passou para o dobro (de 3,7% para 7,4%), que se traduziu na manutenção da oscilação do SoC entre os 20% e 30%, além de um ganho de energia na bateria de 0,56 kWh, em ambos os ensaios.

Nos resultados obtidos inicialmente considerou-se o modo CD (1 ciclo WLTC), em que se obteve um valor de consumo elétrico de 4,17 kWh/100 km para uma capacidade da bateria de 15 kWh e uma potência máxima da bateria de 15 kW (taxa de descarga de 1C), valor que sobe para 7,28 kWh/100 km nas potência máxima da bateria correspondente à taxa de descarga de 2C, sendo o maior consumo elétrico registado nos ensaios. As diferenças observadas com o aumento da potência máxima da bateria estão relacionadas com o valor do SoC inicial-final, que inicialmente (15 kW) registou 4,2%, subindo para 7,3% para uma potência da bateria de 30 kW (taxa de descarga de 2C), equivalente a uma diferença na energia inicial e final da bateria de 1,09 kWh. Ao diminuir a capacidade da bateria e consequentemente a potência da bateria, constatou-se que o consumo elétrico mínimo ocorreu para uma capacidade da bateria de 7,5 kWh e potência da bateria de 7,5 kW, com 0,12 kWh/100 km, uma vez que quando a potência das baterias é pequena, o carro está sempre a recorrer ao *range extender* para cumprir a necessidade de potência elétrica, logo ele consome muito pouca eletricidade mas consome muita gasolina, ou seja, está a usar intensivamente o RE e não está a usar praticamente a eletricidade que foi

carregada na bateria, daí que a autonomia elétrica dê acima dos 5000 km em alguns casos!

Mais uma vez, isto não é bom porque o baixo consumo elétrico é obtido à custa de um elevado consumo de gasolina, que é pior para o custo e as emissões.

Também foi para esta capacidade da bateria (7,5 kWh) que se registou o maior valor do SoC inicial-final neste ciclo WLTC, com um valor de 14,6% para 30 kW de potência da bateria, e igual energia na bateria à registada para a maior potência máxima da bateria dos 15 kWh de capacidade.

Na análise à autonomia elétrica referente ao modo CD, os valores máximos e mínimo foram obtidos para 7,5 kWh de capacidade total da bateria, com valores entre 82,4 km e 5 173,8 km, com a autonomia elétrica a diminuir com o aumento da potência máxima da bateria. Para a capacidade total da bateria máxima considerada, a que correspondem potências máximas da bateria entre 15 e 30 kW foram registadas autonomias entre 164,9 km e 288,0 km. De realçar que autonomia elétrica máxima se destaca dos restantes valores devido ao baixo consumo elétrico registado (0,12 kWh/100 km) para a taxa de descarga de 1C, à custa de um elevado consumo de gasolina.

Nos restantes ciclos WLTC mantiveram-se as tendências de aumento do consumo elétrico com o aumento da potência da bateria. Há a registar a redução do consumo elétrico para 9 ciclos WLTC, sendo o maior valor de 6,53 kWh/100 km quando se considerou uma capacidade de 15 kWh e potência da bateria de 30 kW, coincidindo com a maior descarga da bateria (58,8%) e maior diminuição da energia na bateria (8,82 kWh). Os valores do consumo total de combustível do RE em conjunto com a bateria foram nulos nos ensaios em que a potência máxima da bateria igualou ou superou a potência máxima do motor elétrico, atingindo um máximo de 4,52 L/100 km, com este último valor a ser obtido quando ocorre o menor consumo elétrico.

No modo CS, o consumo elétrico foi negativo (-1,70 kWh/100 km), devido simplesmente às diferenças entre SoC inicial e final que oscilam pouco pois o *range extender* é a principal fonte de eletricidade.

Quanto aos consumos de combustível mantiveram-se constantes nos 2,45 L/100 km para o RE + bateria para 1 e 3 ciclos WLTC até à potência máxima da bateria de 7,5 kW, correspondente à capacidade da bateria de 7,5 kWh. A partir dos 15 kW, e no que respeita a 3 ciclos WLTC, os consumos diminuíram até 2,16 L/100 km quando se atingiu a potência máxima da bateria para esta capacidade. Os consumos de combustível para o RE em exclusivo foram sempre de 2,54 L/100 km, tanto para 1 como para 3 ciclos WLTC.

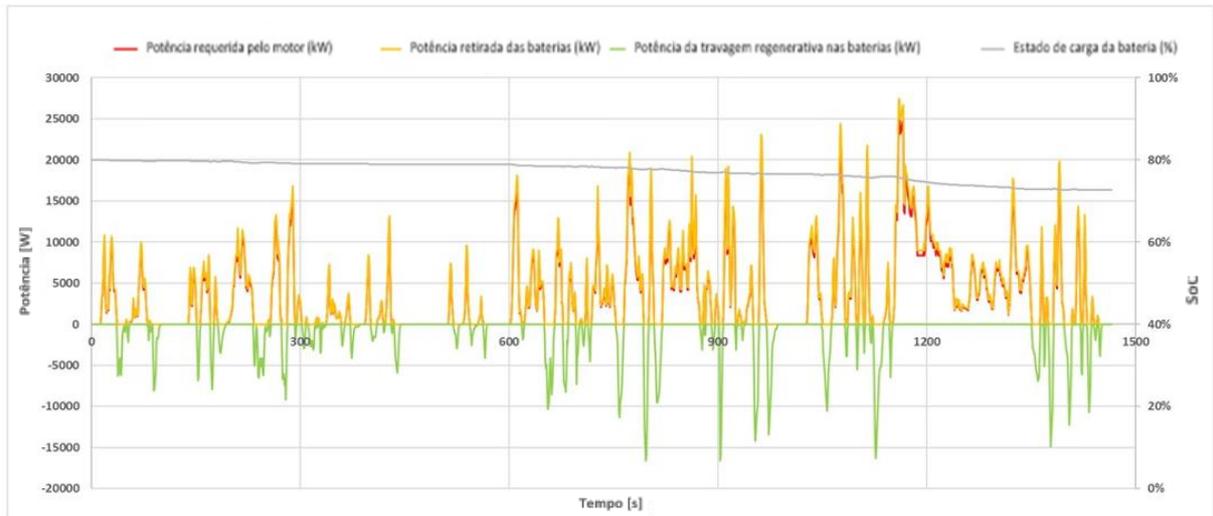
Quando a análise foi feita para 9 ciclos WLTC, houve uma diminuição dos ganhos de capacidade da bateria, com variações desde 0,18 kWh/100 km para potências da bateria a partir de 30 kW, correspondente a 10 kWh de capacidade total da bateria, até 0,53 kWh/100 km para uma potência da bateria de 25 kW, à qual corresponde uma capacidade de 12,5 kWh. O consumo total do RE + bateria, registou valores entre os 2,07 e 3,74 L/100 km, com estes a serem o menor e maior consumo. Também nestes ensaios verificou-se que a diminuição dos ganhos de consumo elétrico nem sempre se traduziu aumento do consumo total do RE + bateria.

No consumo não corrigido (ciclo de 25 km), o valor registado foi constante (2,65 L/100 km), ao passo que o consumo corrigido, entre as capacidades da bateria de 15 e 10 kWh, variou de 2,49 a 2,50 L/100 km, aumentando ligeiramente a variação para 7,5 kWh de capacidade da bateria (2,49 a 2,52 L/100 km). A partir destes valores de consumo corrigido foi possível determinar as emissões corrigidas de CO₂, com estas a variarem entre 57,6 e 58,1 g/km, com as emissões máximas a ocorrerem para a menor capacidade total e potência máxima da bateria.

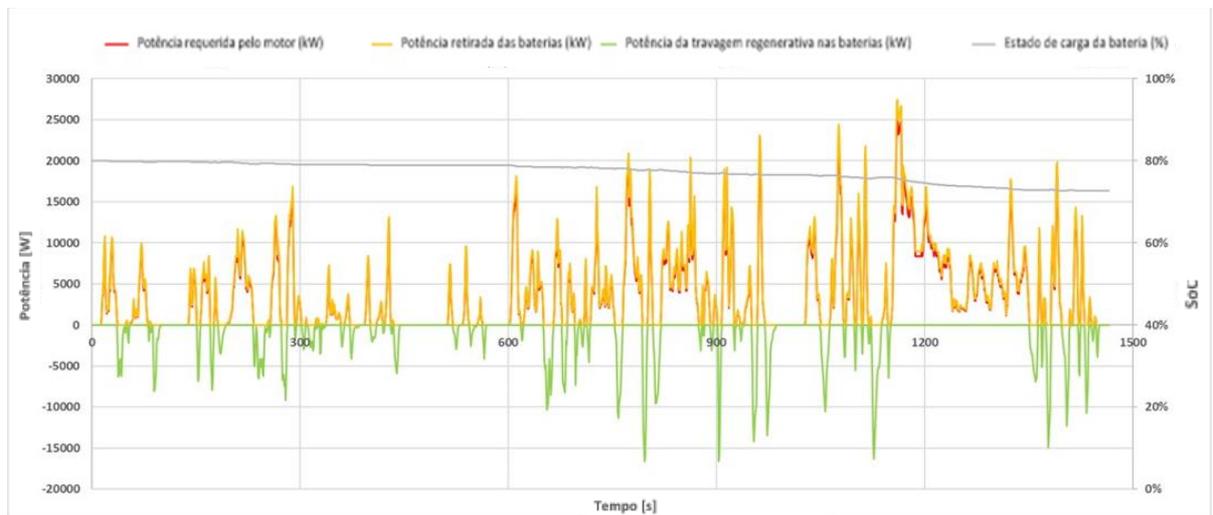
Relativamente à estimativa do consumo e das emissões oficiais, o valor de UF variou entre 1 e 0,86, o que permitiu obter estimativas de consumo oficial entre 0,00 e 0,35 L/100 km, com o maior consumo a ser registado para a menor capacidade total da bateria (7,5 kWh) e maior potência máxima da bateria considerada nos ensaios efetuados (30 kW). A partir destes consumos foi possível determinar as estimativas das emissões oficiais de CO₂, com estas a variarem entre 0,00 e 8,07 g/km.

6.1.3. Tempo mínimo de funcionamento do range extender

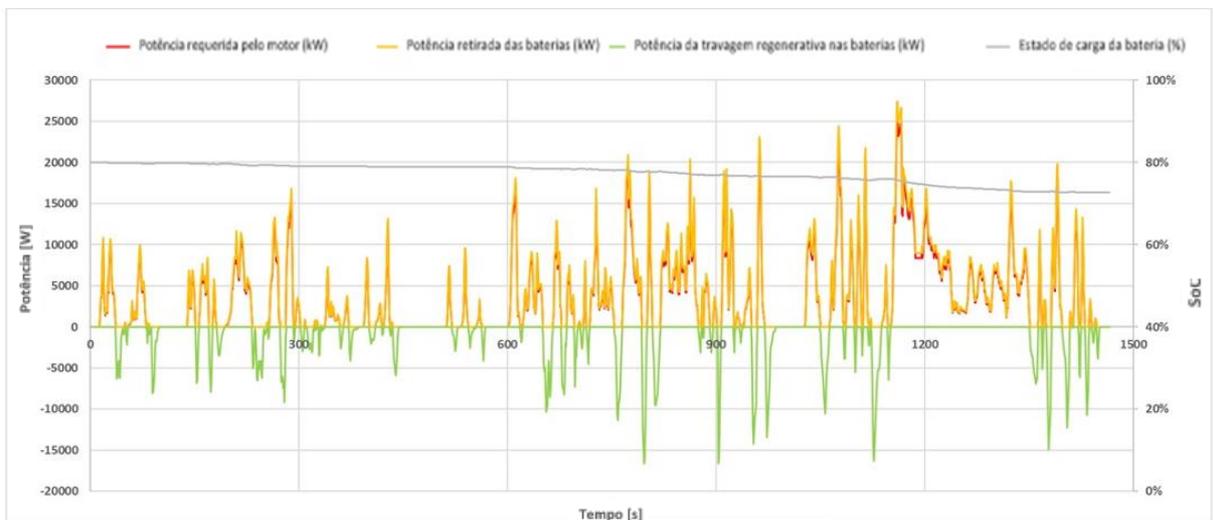
Seguidamente apresentam-se os gráficos relativos aos tempos mínimos de funcionamento do *range extender* para as capacidades totais da bateria de 15 kWh (**Figura 54**) e 7,5 kWh (**Figura 55**), para o modo CD com um SoC inicial de 80% num ciclo WLTC e o modo CS a partir de um SoC de 20% no ciclo WLTC de 25 km.



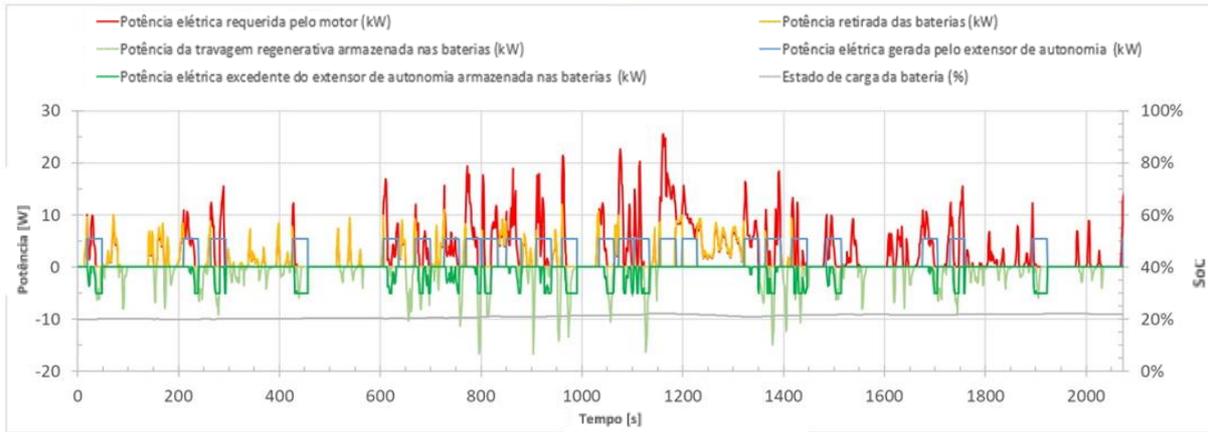
(a1) 30s de funcionamento e 80% de SoC



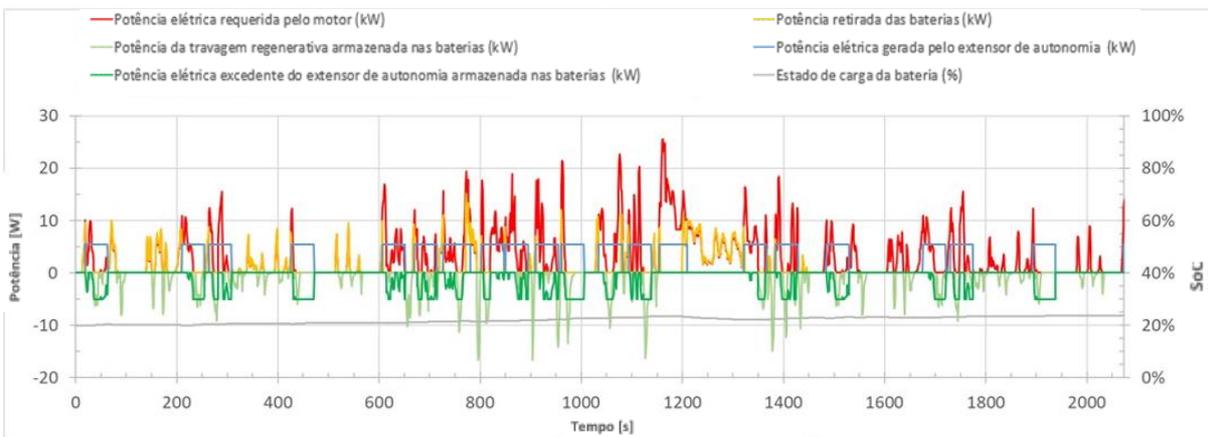
(a2) 60s de funcionamento e 80% de SoC



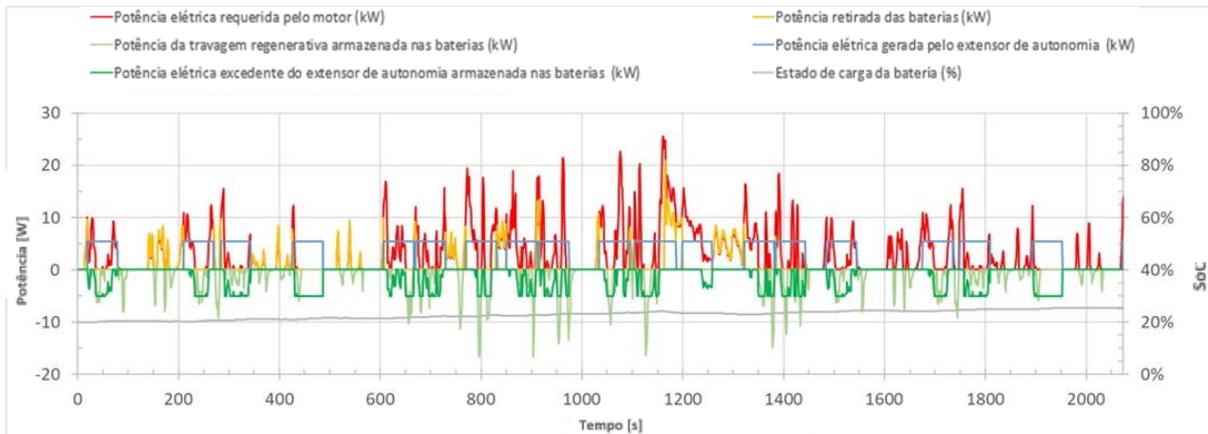
(a3) 90s de funcionamento e 80% de SoC



(b₁) 30s de funcionamento e 20% de SoC

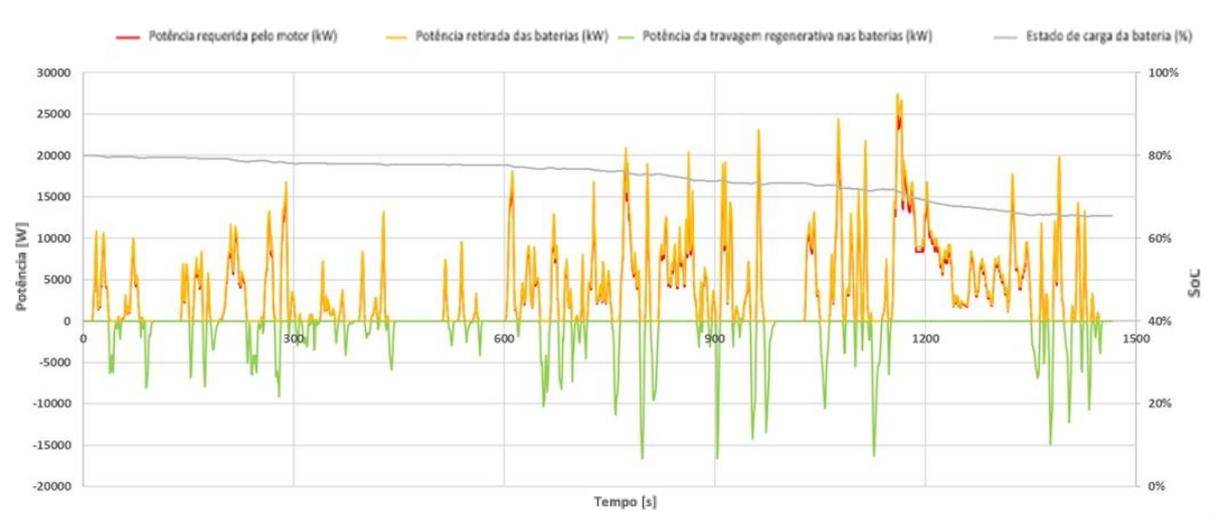


(b₂) 60s de funcionamento e 20% de SoC

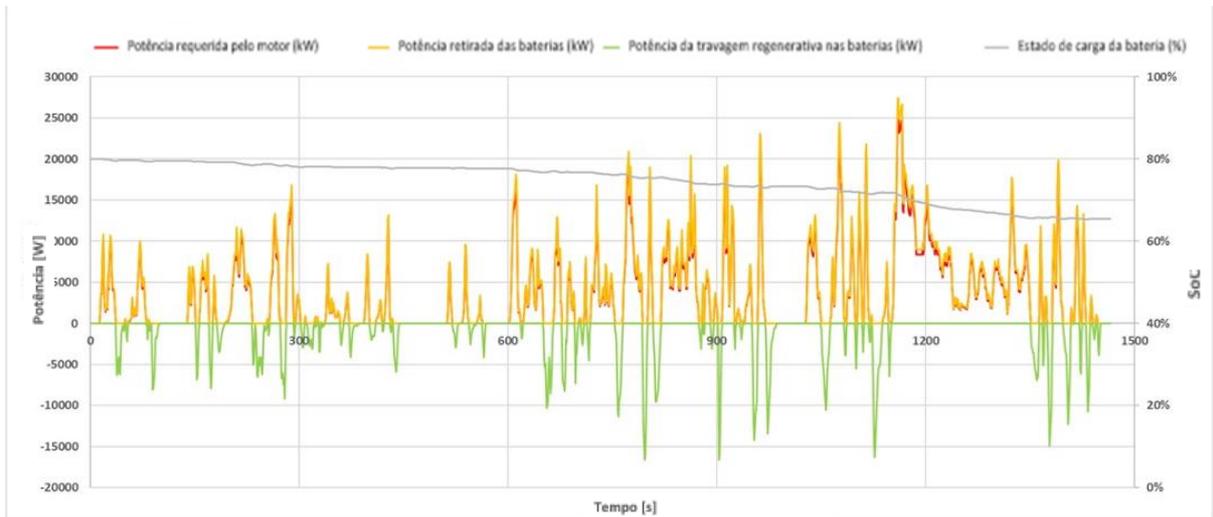


(b₃) 90s de funcionamento e 20% de SoC

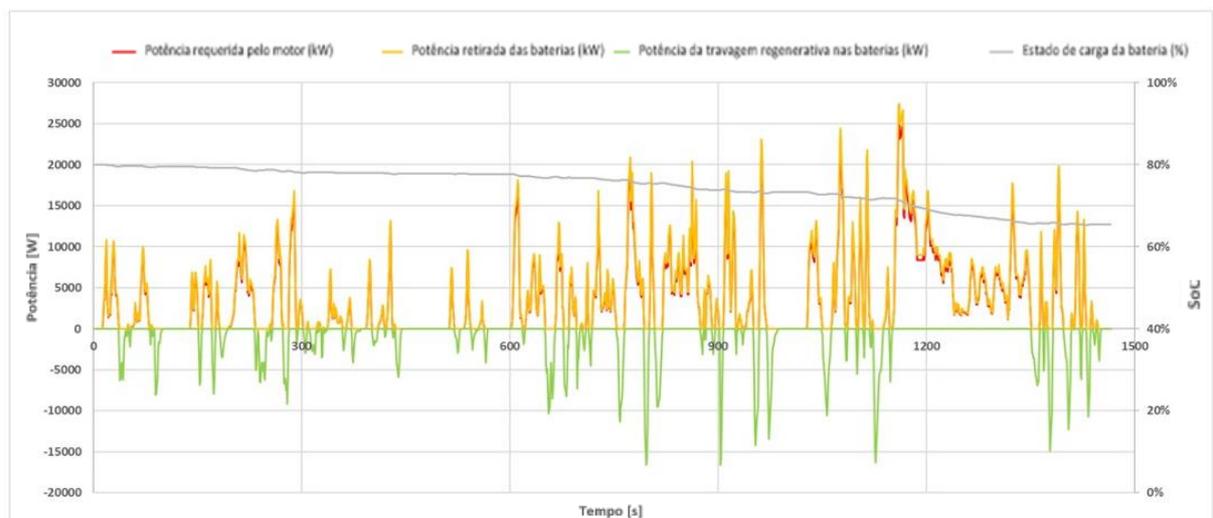
Figura 54 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do *range extender* para uma capacidade total da bateria de 15 kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).



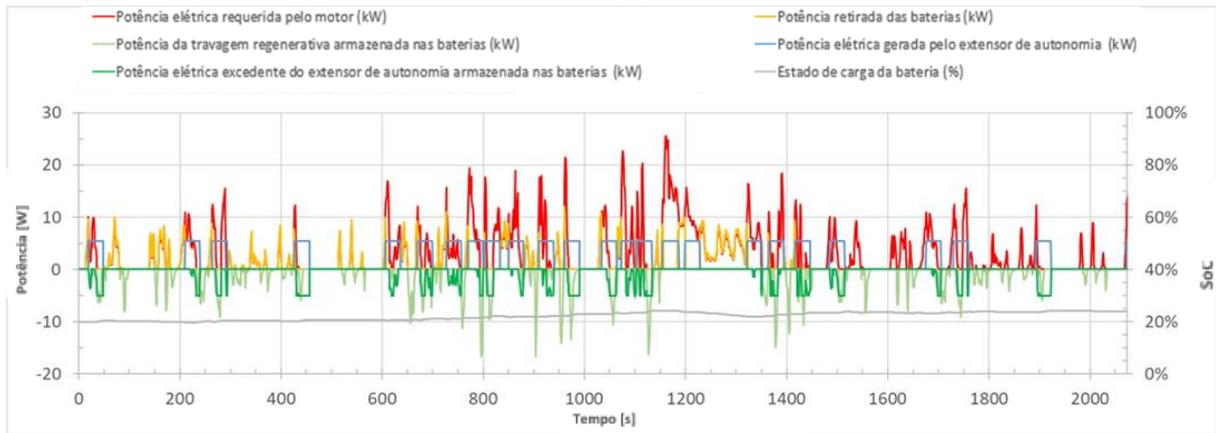
(a1) 30s de funcionamento e 80% de SoC



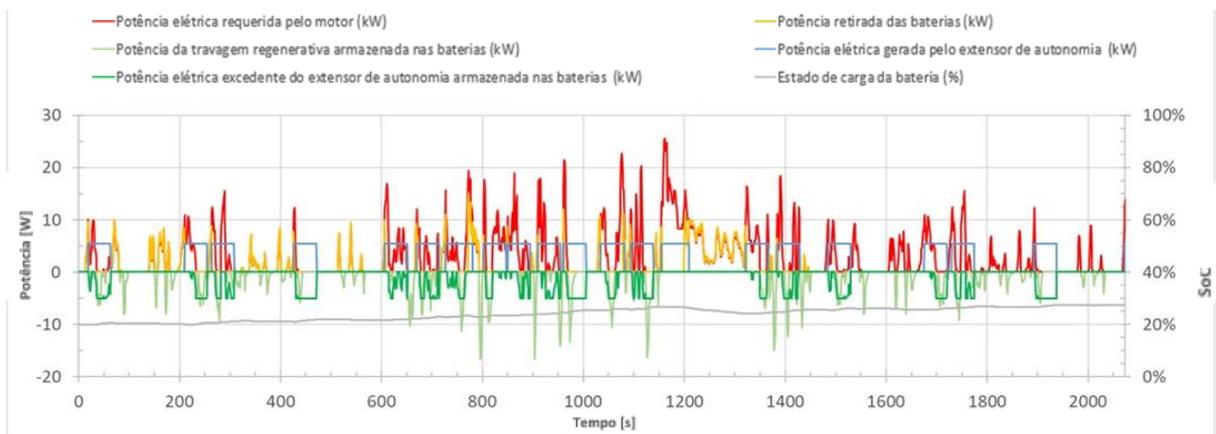
(a2) 60s de funcionamento e 80% de SoC



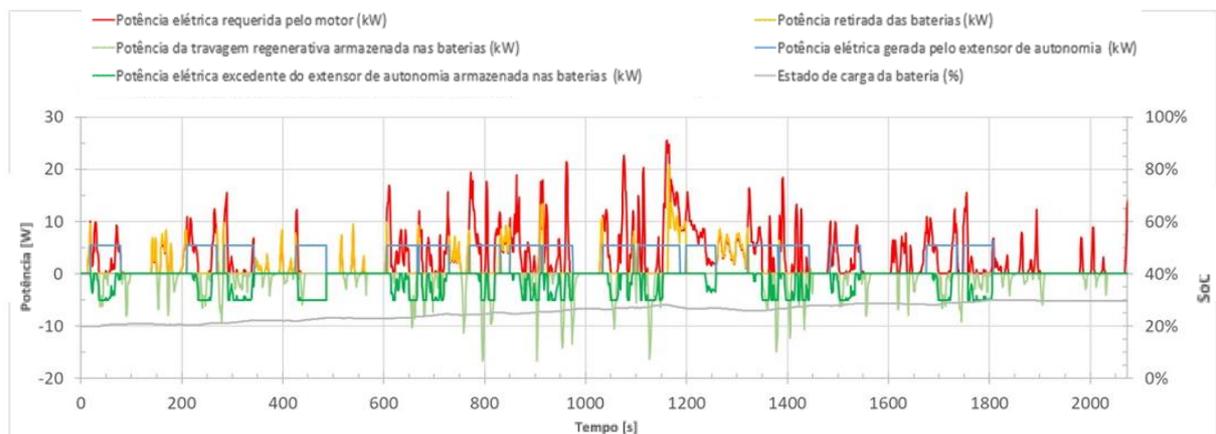
(a3) 90s de funcionamento e 80% de SoC



(b1) 30s de funcionamento e 20% de SoC



(b2) 60s de funcionamento e 20% de SoC



(b3) 90s de funcionamento e 20% de SoC

Figura 55 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do *range extender* para uma capacidade total da bateria de 7,5kWh: a) modo CD, com 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).

Os valores dos consumos obtidos são apresentados na Tabela 21 à Tabela 23.

Tabela 21 – Resultados das simulações, no modo CD, para um SoC de 80%, relativos ao tempo mínimo de funcionamento do *range extender* de 30s, 45s e 60s, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

a)

b)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 80%)	
Capacidade da bateria (kWh)	15
Redução total do SoC da bateria (%)	7,3
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,09
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00
Autonomia elétrica no modo CD (km)	164,9

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 80%)	
Capacidade da bateria (kWh)	7,5
Redução total do SoC da bateria (%)	14,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,09
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00
Autonomia elétrica no modo CD (km)	82,4

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 80%)	
Capacidade da bateria (kWh)	15
Redução total do SoC da bateria (%)	21,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,28
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 80%)	
Capacidade da bateria (kWh)	7,5
Redução total do SoC da bateria (%)	43,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,28
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Redução total do SoC da bateria (%)	58,8	58,6	57,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	8,82	8,79	8,66
Consumo elétrico (kWh/100 km)	6,53	6,51	6,41
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,19	0,21	0,26

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Redução total do SoC da bateria (%)	53,7	57,7	57,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	4,02	4,32	4,34
Consumo elétrico (kWh/100 km)	2,98	3,20	3,21
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	1,19	1,24	1,32

WLTC 25 km	
Redução total do SoC da bateria (%)	25,0
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,87
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00
K_{fuel}	0,00
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,00

WLTC 25 km	
Redução total do SoC da bateria (%)	12,5
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,87
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00
K_{fuel}	0,00
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,00

Tabela 22 – Resultados da simulação, no modo CS, para um SoC inicial de 20%, relativos ao tempo mínimo de funcionamento do *range extender* de 30s, 45s e 60s, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

a)

WLTC x1 (Distância de 15,0 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Redução total do SoC da bateria (%)	-1,7	-2,8	-3,9
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,25	-0,42	-0,59
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,70	-2,78	-3,92
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45	3,02	3,54
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54		

b)

WLTC x1 (Distância de 15,0 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Redução total do SoC da bateria (%)	-3,4	-5,6	-7,9
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,25	-0,42	-0,59
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,70	-2,78	-3,92
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45	3,02	3,54
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54		

WLTC x3 (Distância de 45,0 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Redução total do SoC da bateria (%)	-5,1	-8,3	-4,5
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,76	-1,25	-0,67
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-1,70	-2,78	-1,50
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,45	3,02	2,85
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54		

WLTC x3 (Distância de 45,0 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Redução total do SoC da bateria (%)	-2,6	-4,5	-8,3
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,20	-0,34	-0,62
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,44	-0,75	-1,38
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,16	2,45	2,76
Consumo do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	2,54		

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Redução total do SoC da bateria (%)	-3,7	-6,2	-4,0
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,56	-0,93	-0,61
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,42	-0,69	-0,45
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,56		

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Redução total do SoC da bateria (%)	-8,8	-1,5	-8,9
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,66	-0,11	-0,67
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,49	-0,08	-0,49
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,56		

WLTC 25 km			
Redução total do SoC da bateria (%)	-3,7	-6,1	-7,5
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,56	-0,91	-1,13
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,65	3,35	3,81
K_{fuel}	0,27	0,34	0,39
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,49	3,04	3,37

WLTC 25 km			
Redução total do SoC da bateria (%)	-7,4	-6,3	-1,5
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,56	-0,47	-0,11
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,65	2,93	2,56
K_{fuel}	0,27	0,30	0,26
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,49	2,79	2,53

Tabela 23 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus no modo CS, para um SoC inicial de 20%, relativos ao tempo mínimo de funcionamento do *range extender* de 30s, 45s e 60s, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

	a)		
Fator de Utilidade (UF)	0,96		
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)	0,10	0,12	0,15
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)	2,31	2,81	3,11

	b)		
Fator de Utilidade (UF)	0,86		
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)	0,35	0,39	0,35
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)	8,07	9,02	8,19

Nas simulações referentes ao tempo mínimo de funcionamento do *range extender* verifica-se que, no modo CD, presentes na **Figura 54 a** e **Figura 55 a** para 1 ciclo WLTC, o extensor de autonomia manteve a tendência verificada nos ensaios anteriores e nunca entrou em funcionamento, pois o SoC mínimo para ativação do RE (20%) nunca foi atingido. No que respeita à potência elétrica necessária pelo motor, esta nunca excedeu a potência da bateria, razão pela qual o RE não precisou ser ligado. Nestas figuras, as diferenças observadas prenderam-se com o estado de carga da bateria, que diminuiu com a diminuição da capacidade total da bateria.

Na **Figura 54 b** e **Figura 55 b** são exibidos os resultados para o modo CS, que é ativado quando o SoC cai abaixo de 20%. No ciclo WLTC estendido, o extensor de autonomia entrou em funcionamento durante alguns períodos a uma potência constante correspondente à configuração ECO. O estado de carga da bateria oscilou entre 20% e 30%, carga a partir da qual o modo elétrico voltou a entrar em funcionamento.

Primeiramente considerou-se o modo CD (1 ciclo WLTC), no qual o consumo elétrico se manteve constante nos 7,28 kWh/100 km para uma capacidade da bateria de 15 kWh, independentemente do tempo mínimo de funcionamento do RE considerado, com este a ser o maior consumo elétrico verificado nos diversos ensaios. Para 1 e 3 ciclos WLTC, tanto para uma capacidade total da bateria de 15 kWh como para 7,5 kWh, observa-se que as diferenças registadas se prenderam com a diferença entre o estado de carga inicial e final, que variou entre 7,3% e 14,6%, a que correspondeu uma perda de energia de 1,09 kWh, para 1 ciclo WLTC, passando a 21,8% e 43,7% em 3 ciclos WLTC, a que corresponde uma perda de energia na bateria de 3,28 kWh.

Ao considerar 9 ciclos WLTC, já é possível observar diferenças a nível do consumo elétrico, com valores entre 6,53 kWh/100 km para 15 kWh de capacidade da bateria e 2,98 kWh/100 km para 7,5 kWh de capacidade da bateria, com ambos os valores a ocorrerem para 30s de tempo mínimo de funcionamento do RE.

Relativamente aos valores do consumo total de combustível do RE em conjunto com a bateria foram nulos para ambas as capacidades da bateria, quando se consideraram 1 e 3 ciclos WLTC. Ao passar para 9 ciclos WLTC, os valores deste parâmetro oscilaram entre 0,19 L/100 km para 15 kWh de capacidade e 30s de funcionamento do RE e um máximo de 1,32 L/100 km para a capacidade de 7,5 kWh e 60s de funcionamento do *range extender*.

Posteriormente foi feita a análise da autonomia em modo elétrico referente ao modo CD, com o valor máximo de 164,9 km a ocorrer para a capacidade da bateria de 15 kWh e o mínimo de 82,4 km para

7,5 kWh de capacidade total da bateria, com os valores da autonomia elétrica a manterem-se constantes para a mesma capacidade da bateria, uma vez que a autonomia é função apenas da capacidade da bateria no modo CD e do consumo elétrico, valores que, como ilustra a **Tabela 21**, se mantiveram constantes.

Passando para o modo CS, na análise de 1 ciclo WLTC, tal como registado nos parâmetros vistos antes, registaram-se ganhos de energia que variaram entre 1,70 kWh/100 km e 3,92 kWh/100 km, com o valor máximo a ocorrer para 60s de tempo mínimo de funcionamento do extensor de autonomia, independentemente da capacidade da bateria considerada. Quanto aos consumos de combustível, os valores variaram entre 2,45 L/100 km para 30s de funcionamento do RE até 3,54 L/100 km para 90s em ambas as capacidade da bateria, no que diz respeito ao RE + bateria.

Observando os resultados para 3 ciclos WLTC, os ganhos de energia são menores, oscilando entre 1,50 kWh/100 km e 2,78 kWh/100 km, com este último valor a ocorrer para 45s de funcionamento do RE e 15 kWh de capacidade da bateria e entre 0,44 kWh/100 km e 1,38 kWh/100 km, para 60s e 7,5 kWh de capacidade da bateria. Nos consumos de combustível do RE em conjunto com a bateria, os valores variaram entre 2,45 L/100 km para 30s de funcionamento do RE e 3,02 L/100 km para 45s, ambos para 15 kWh de capacidade da bateria, e entre 2,16 L/100 km para 30s de funcionamento do RE até 2,76 L/100 km para 60s, considerando uma capacidade da bateria de 7,5 kWh. Os consumos de combustível para o RE em exclusivo foram sempre de 2,54 L/100 km, tanto para 1 como para 3 ciclos WLTC.

Nos ensaios para 9 ciclos WLTC, houve uma diminuição dos ganhos de capacidade da bateria, com variações desde 0,08 kWh/100 km para 45s de tempo de funcionamento do RE correspondente a 7,5 kWh de capacidade total da bateria, até 0,69 kWh/100 km para 45s e 15 kWh. O consumo total do RE + bateria máximo foi registado para 7,5 kWh de capacidade, com valores entre os 2,15 e 2,52 L/100 km. O valor mínimo registou-se para a capacidade de 15 kWh e 30s de funcionamento do extensor de autonomia, com um consumo total do RE + bateria de 2,13 L/100 km. De referir que para o mesmo consumo elétrico não houve o mesmo consumo de combustível, devido ao facto da energia da bateria e do consumo do *range extender* diferirem.

No consumo não corrigido (ciclo de 25 km), o valor registado foi igual para ambas as capacidades da bateria, quando se consideraram 30s como tempo mínimo de funcionamento do RE (2,65 L/100 km), ao passo que para 45 s os consumos foram de 3,35 e 2,93 L/100 km. Ao aumentar o tempo de funcionamento do RE para 60s, verificou-se um consumo de 3,81 L/100 km para 15 kWh de capacidade

e 2,56 L/100 km para 7,5 kWh de capacidade da bateria.

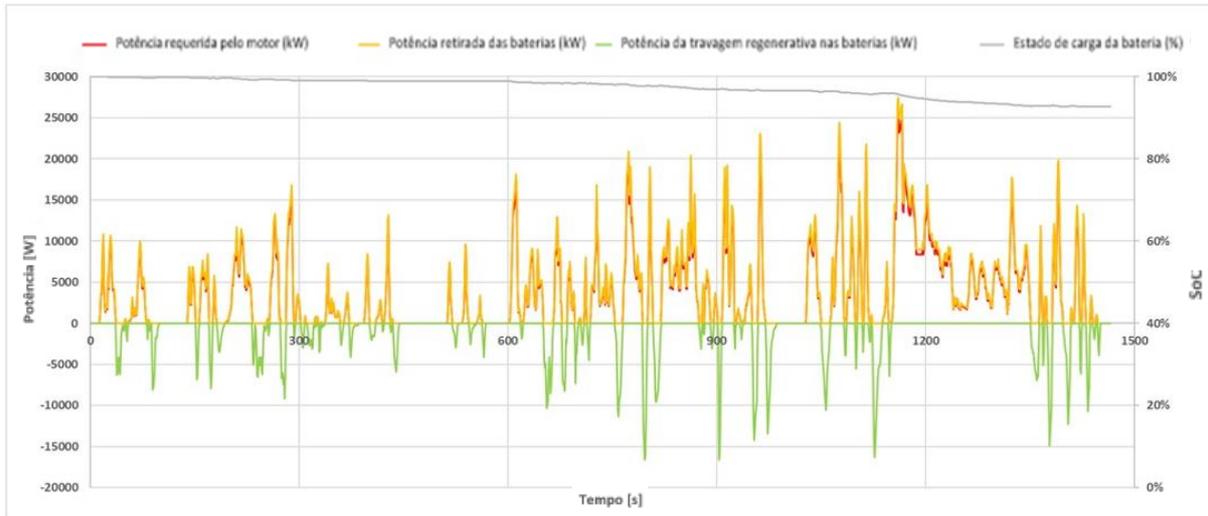
No consumo corrigido, o valor mínimo foi obtido para 30s de funcionamento do RE em ambas as capacidade da bateria (2,49 L/100 km), enquanto o consumo máximo ocorreu para 60s de funcionamento do RE e capacidade da bateria de 15 kWh, com um valor de 3,37 L/100 km. Com os valores do consumo corrigido foi possível determinar as emissões corrigidas de CO₂, com estas a variarem entre 57,6 e 77,8 g/km, com as emissões máximas a ocorrerem para 30 e 60s de tempo de funcionamento do RE e para a maior capacidade total da bateria.

Por fim, na análise da estimativa do consumo e das emissões oficiais, o valor de UF variou entre 0,96 e 0,86, o que permitiu obter estimativas de consumo oficial entre 0,10 e 0,39 L/100 km, com o menor consumo a acontecer para 30s de funcionamento do RE e 15 kWh de capacidade da bateria e o maior consumo a ser registado para a menor capacidade total da bateria e 45s de tempo mínimo de funcionamento do RE. Ao menor consumo oficial corresponderam as menores emissões oficiais de CO₂ e ao maior consumo as maiores emissões, sendo estes valores de 2,31 g/km e 9,02 g/km, respetivamente.

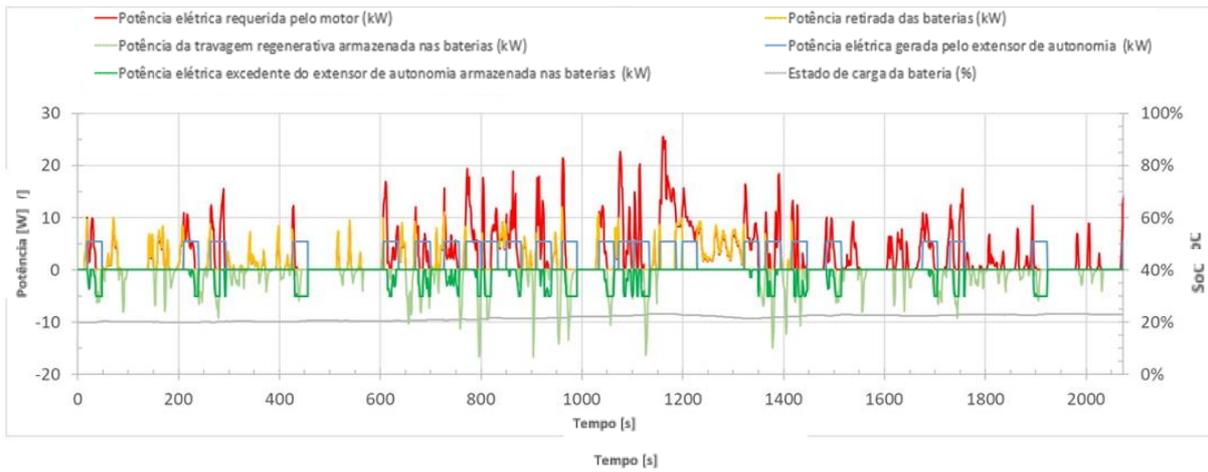
6.1.4. Estado de carga inicial da bateria (SoC)

Para este parâmetro foram efetuadas simulações em que o parâmetro variado foi o estado de carga inicial, para o qual se considerou como valores iniciais 100%, 80%, 50% e 20%. Os valores de 80% e 20% tiveram em linha de conta a faixa de utilização recomendada para as baterias de íões de lítio, tal como mencionado no subcapítulo 6.1.1. Já as cargas de 100% e 50% referem-se à carga máxima possível nas baterias e a metade da carga, respetivamente. Os diferentes SoC da bateria referiram-se às diferentes capacidades totais da bateria usadas nas simulações (entre 15 e 7,5 kWh), nas potências máximas da bateria correspondentes à taxa de descarga de 4C. Dado os valores da autonomia, consumos e emissões oficiais já terem sido abordados nos subcapítulos anteriores, não foram simulados neste parâmetro.

Para permitir ter uma perceção da variação dos estados de carga considerados nos ensaios, são apresentados os gráficos para a carga total (100%) sob 1 ciclo WLTC (**Figura 56 a** e **Figura 57 a**) e o modo CS (20% de carga) sob o ciclo WLTC de 25 km (**Figura 56 b** e **Figura 57 b**). Como se pode ver na figura anterior, o valor dos consumos foi idêntico entre 100% e 50%, pelo que se optou por representar os gráficos para 100%, além dos gráficos para 20%, estado de carga onde se observam as maiores diferenças.

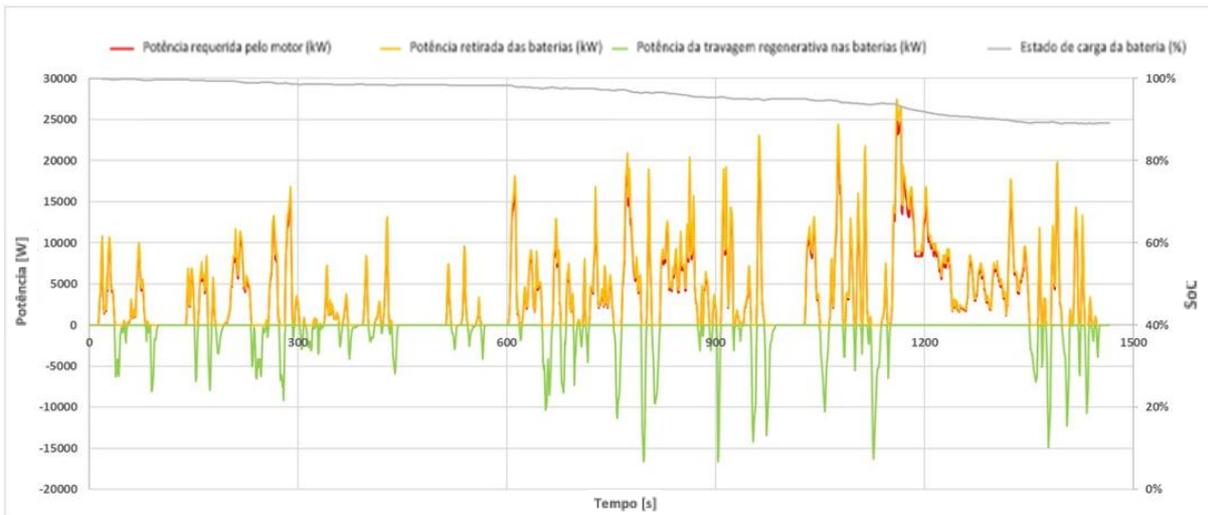


(a) SoC de 100%

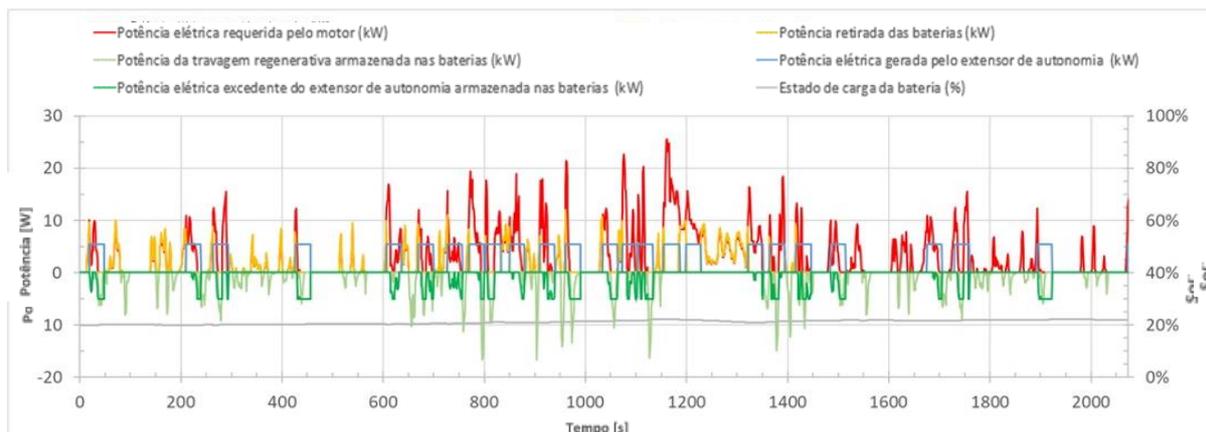


(b) SoC de 20%

Figura 56 – Estado de carga correspondentes aos vários SoC, para uma bateria de 15 kWh: a) 100% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).



(a) SoC de 100%



(b) SoC de 20%

Figura 57 – Estado de carga correspondentes aos vários SoC, para uma bateria de 7,5 kWh: a) 100% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).

Os valores dos consumos obtidos são apresentados na Tabela 24:

Tabela 24 – Resultados das simulações referentes ao estado de carga inicial da bateria (SoC) de 100% 80%, 50% e 20%, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 12,5 kWh, c) 10 kWh e d) 7,5 kWh.

a)

WLTC x1 (Distância de 15 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	7,3			-1,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,09			-0,25
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28			-1,7
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			2,45

b)

WLTC x1 (Distância de 15 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	12,5			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	8,7			-2,0
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,09			-0,25
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28			-1,7
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			2,45

WLTC x3 (Distância de 45 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	21,8			-5,1
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,28			-0,76
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28			-1,7
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			2,45

WLTC x3 (Distância de 45 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	12,5			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	26,2			-6,1
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,28			-0,76
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28			-1,7
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			2,45

WLTC x9 (Distância de 135,1 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	15			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	65,5	58,8	21,5	-3,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	9,83	8,82	3,22	-0,56
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28	6,53	2,38	-0,42
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00	0,19	1,34	2,13

WLTC x9 (Distância de 135,1 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	12,5			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	78,6	55,6	26,0	-5,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	9,83	8,82	3,22	-0,56
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28	5,15	2,41	-0,50
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00	0,59	1,34	2,15

WLTC 25 km				
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	12,5			-3,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,87			
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			
K_{fuel}	0,00			
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,00			2,49

WLTC 25 km				
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	15,0			-4,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,56			
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,65			
K_{fuel}	0,00			
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,00			2,49

c)

WLTC x1 (Distância de 15 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	10			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	10,9			-2,5
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,09			-0,25
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28			-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			2,45

d)

WLTC x1 (Distância de 15 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	7,5			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	14,6			-3,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,09			-0,25
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28			-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			2,45

WLTC x3 (Distância de 45 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	10			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	32,8		30,1	-7,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,28		3,01	-0,76
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28		6,69	-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00		0,16	2,45

WLTC x3 (Distância de 45 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	7,5			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	43,7		26,4	-2,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,28		1,98	-0,20
Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28		4,40	-0,44
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00		0,78	2,16

WLTC x9 (Distância de 135,1 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	10			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	76,0	51,8	26,0	-2,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	7,60	5,18	2,60	-0,24
Consumo elétrico (kWh/100 km)	5,63	5,83	1,92	-0,18
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,56			

WLTC x9 (Distância de 135,1 km)				
Capacidade da bateria (kWh)	7,5			
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	77,4	53,7	28,1	-8,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	5,81	4,02	2,11	-0,66
Consumo elétrico (kWh/100 km)	4,30	2,98	1,56	-0,49
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,56			

WLTC 25 km				
SoC inicial da bateria (%)	100	80	50	20
Redução total do SoC da bateria (%)	18,7			-5,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,87			-0,56
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00			2,65
K_{fuel}	0,00			0,27
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,00			2,49

Após as simulações relativas ao estado de carga da bateria, há a registar, a partir da **Figura 56 a** e **Figura 57 a** para 1 ciclo WLTC, que o extensor de autonomia, como seria de esperar, nunca entrou em funcionamento, visto o consumo elétrico ter sido sempre inferior à capacidade total da bateria. A potência elétrica necessária pelo motor foi sempre inferior à potência da bateria, pelo que não foi necessário o RE ser ligado. As diferenças observadas apenas se prendem com o estado de carga da bateria, que diminui com a diminuição da capacidade total da bateria.

Passando para a **Figura 56 b** e **Figura 57 b**, os gráficos apresentados ilustram os parâmetros de potência e estado de carga para o modo CS, correspondente ao ciclo WLTC estendido, no qual o SoC é inferior a 20%. Neste ciclo, registou-se o funcionamento do RE durante alguns períodos a uma potência constante correspondente à configuração ECO. Em linha com o que se constatou anteriormente, o estado de carga da bateria oscilou entre 20% e 30%, sendo que a partir deste último valor, o modo elétrico voltou a entrar em funcionamento.

Começando por analisar 1 ciclo WLTC, o consumo elétrico fixou-se nos 7,28 kWh/100 km entre os 100% e os 50% (modo CD), para todas as capacidades da bateria estudadas, sendo este valor o maior consumo elétrico verificado nos diversos ensaios. Tal facto deveu-se à manutenção da diferença entre as energias inicial e final da bateria e está em linha com o que foi mencionado no subcapítulo 6.1.1., em que o valor da potência máxima da bateria ao igualar a potência máxima do motor elétrico, fixada em 30 kW, tende a estabilizar o valor dos consumos. O fator de distinção observado nos diversos ensaios acabou por ser os estados de carga inicial e final (7,3%, correspondentes a um ganho de energia na bateria de 1,09 kWh, para 15 kWh de capacidade total da bateria, até um máximo de 14,6% e igualmente 1,09 kWh de energia na bateria, para 7,5 kWh de capacidade). Apenas para 20% de SoC (modo CS), como se pôde constatar em subcapítulos anteriores, existem diferenças nos consumos, nomeadamente com ganhos de energia na bateria (0,25 kWh), o que permitiu aumentar a capacidade da bateria, assim com o estado de carga da mesma (aumento de 1,7% a 3,4%).

Para 3 ciclos WLTC, mantiveram-se os consumos elétricos, quando foram consideradas as capacidades da bateria de 15 e 12,5 kWh, apenas havendo alterações na diferença entre as cargas inicial e final e na energia na bateria (de 21,8% para 26,2%, a que corresponde uma perda de energia na bateria de 3,28 kWh, no modo CD, e ganhos de 5,1% para 6,1%, com ganhos de energia de 0,76 kWh, no modo CS). Na capacidade da bateria de 10 kWh verificou-se que no SoC de 50%, o consumo elétrico baixou de 7,28 kWh/100 km para 6,69 kWh/100 km, com este a ser o único valor a destoar dos consumos anteriores, para cargas entre 100% e 50%. A diferença entre o SoC inicial e final registou um aumento de 6,6% (de 26,2% para 32,8%), sendo que também houve um ganho de carga na bateria, atingindo os 7,6%, a que correspondeu um ganho de energia na bateria de 0,76 kWh, para 10 kWh de capacidade total da bateria. Na menor capacidade da bateria considerada, os consumos elétricos mantiveram o valor máximo de 7,28 kWh/100 km até 80% de carga na bateria, passando a ser de 4,40 kWh/100 km para 50% de SoC, o que se traduziu numa diminuição do consumo, quando comparado com os 6,69 kWh/100 km dos 10 kWh de capacidade. A maior diferença entre o SoC inicial e final foi de 43,7% nos ensaios de 100% e 50% de SoC, com o ganho de energia no consumo elétrico a baixar de 1,70 kWh/100 km para 0,44 kWh/100 km, a que correspondeu também uma diminuição dos ganhos de energia na bateria, de 0,25 kWh para 0,20 kWh.

Ao considerar 9 ciclos WLTC, já é possível observar diferenças a nível do consumo elétrico, com valores entre 7,28 kWh/100 km para 15 kWh e 12,5 kWh de capacidade da bateria (100% de SoC) e 1,56 kWh/100 km para 7,5 kWh de capacidade da bateria (50% de SoC). No que respeita à diferença entre o estado de carga inicial e final, o maior valor obtidos nos ensaios ocorreu para uma capacidade

da bateria de 7,5 kWh e 100% de SoC inicial, com um valor de 77,4% de diferença, o que se traduziu numa carga final na bateria de 22,6%, e uma diferença na energia da bateria de 5,81 kWh.

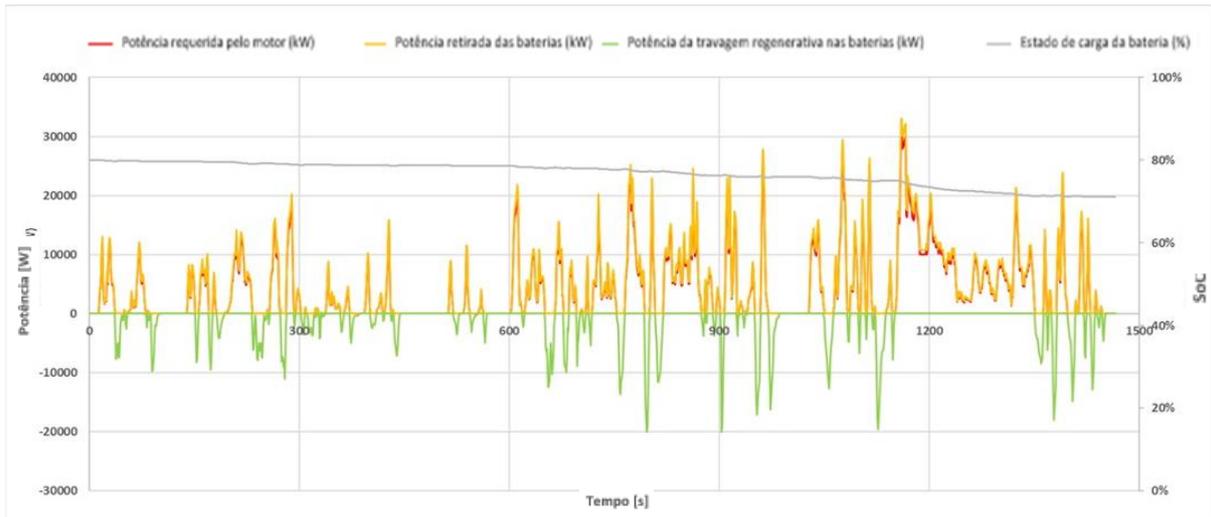
Relativamente aos valores do consumo total de combustível do RE em conjunto com a bateria foram nulos entre 100% e 50% em 1 ciclo WLTC, sendo de 2,45 L/100 km para 20% de carga ao longo deste ciclo. Na análise deste parâmetro para 3 ciclos WLTC há a manutenção dos consumos consoante o SoC até à capacidade da bateria de 12,5 kWh, aumentando para 0,16 L/100 km na capacidade de 10 kWh e 50% de SoC, mantendo-se o máximo de 2,45 L/100 km no modo CS. Para a capacidade mínima da bateria considerada nos ensaios (7,5 kWh), o consumo aumentou novamente para 50% de SoC, registando-se um consumo de 0,78 L/100 km. No entanto, o consumo no modo CS diminuiu, passando a ser de 2,16 L/100 km. Ao passar para 9 ciclos WLTC, os valores deste parâmetro oscilaram entre 0,19 L/100 km para 15 kWh de capacidade e 80% de estado de carga da bateria e um máximo de 2,15 L/100 km para as capacidades de 12,5 kWh e 7,5 kWh, quando se encontram no modo CS (20% de SoC). Os consumos com o uso exclusivo do extensor de autonomia mantiveram o valor registado nos parâmetros anteriores (2,54 L/100 km) para 1 e 3 ciclos WLTC, subindo ligeiramente para 2,56 L/100 km quando a análise foi feita para 9 ciclos.

No consumo não corrigido (ciclo de 25 km), em todas as capacidades da bateria estudadas, o valor do consumo foi nulo entre 100% e 50% de carga, ao passo que ao diminuir a carga para 20%, os consumos subiram para de 2,65 L/100 km. No consumo corrigido, a tendência verificada para o consumo não corrigido manteve-se, com a única diferença a ser o consumo para o modo CS, que desceu para 2,49 L/100 km em todas as capacidades da bateria.

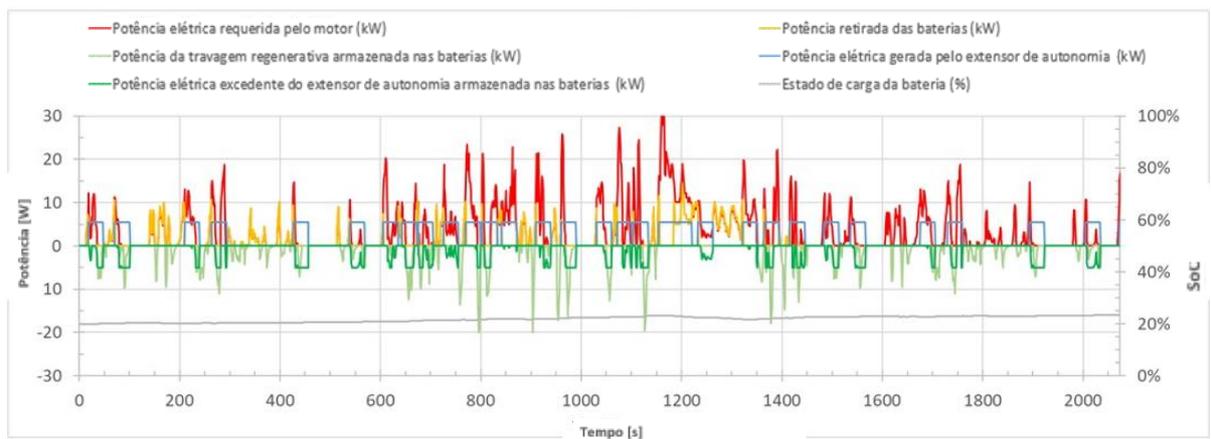
6.1.5. Massa do veículo

No parâmetro a analisar, referente à massa do veículo, foram consideradas as massas de 1 000 kg, 1 100 kg e 1 200 kg, de modo a irem de encontro não só à massa do veículo pretendida (1 000 kg), como também à massa bruta do modelo considerado (1 240 kg), sendo que neste caso se considerou uma massa próxima (1 200 kg). Relativamente aos restantes parâmetros, apenas se variaram as capacidades totais da bateria para 15 e 7,5 kWh, uma vez que, tal como em parâmetros avaliados anteriormente, foram as capacidades em que ocorreram os valores mínimos e máximos dos consumos elétrico e do RE, com o valor máximo para a capacidade considerada no *kit* (10 kW) a ter valores máximos semelhantes aos verificados para 15 kW, mantendo-se sempre as potências máximas da bateria correspondentes à taxa de descarga de 4C. Para estas simulações foram ainda considerados os estados de carga inicial, fixados em 80% e 20%, tal como anteriormente.

De modo a complementar os resultados obtidos anteriormente, são apresentados abaixo os gráficos relativos às diferentes massas do veículo consideradas para as capacidades totais da bateria de 15 kWh (Figura 58) e 7,5 kWh (Figura 59), para o modo CD com um SoC inicial de 80% num ciclo WLTC e o modo CS a partir de um SoC de 20% no ciclo WLTC de 25 km.

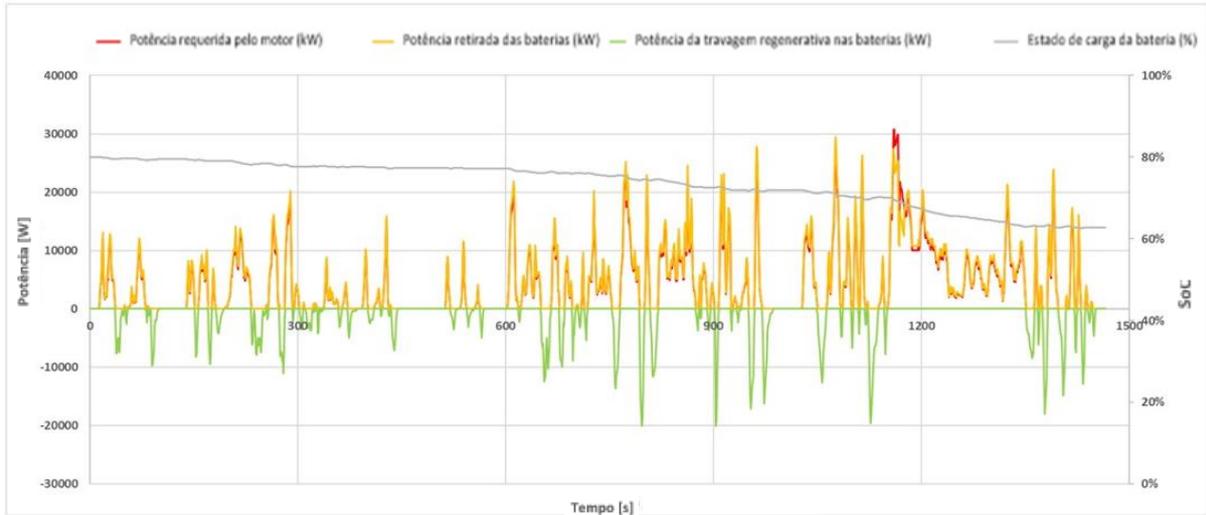


(a)

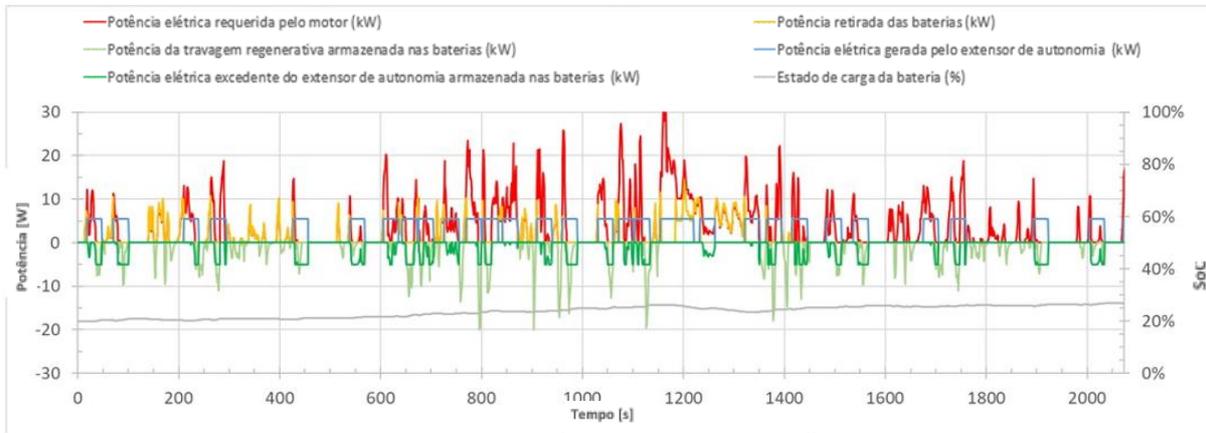


(b)

Figura 58 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes às várias massas do veículo, para uma capacidade total da bateria de 15 kWh: a) 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).



(a.)



(b.)

Figura 59 – Parâmetros de potência e estado de carga correspondentes às várias massas do veículo, para uma capacidade total da bateria de 7,5 kWh: a) 80% de carga inicial sob um único ciclo WLTC e b) modo CS, com 20% de carga inicial para o ciclo WLTC estendido (25 km).

Os valores dos consumos obtidos são apresentados na **Tabela 25** à **Tabela 27**:

Tabela 25 - Resultados das simulações, no modo CD, para um SoC de 80%, e massas do veículo de 1 200 kg, 1 100 kg e 1 000 kg, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh

a)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	8,8	8,0	-7,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,32	1,20	1,09
Consumo elétrico (kWh/100 km)	8,78	8,03	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00		
Autonomia elétrica em modo CD (km)	136,7	149,5	164,9

b)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	17,2	16,1	14,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	1,29	1,20	1,09
Consumo elétrico (kWh/100 km)	8,58	8,03	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,13	0,00	0,00
Autonomia elétrica em modo CD (km)	69,9	74,7	82,4

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	26,3	24,1	21,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,95	3,61	3,28
Consumo elétrico (kWh/100 km)	8,78	8,03	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00		

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	51,5	48,2	43,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	3,86	3,61	3,28
Consumo elétrico (kWh/100 km)	8,58	8,03	7,28
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,13	0,00	0,00

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	55,0	57,5	58,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	8,24	8,62	8,82
Consumo elétrico (kWh/100 km)	6,10	6,38	6,53
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,70	0,41	0,19

WLTC 25 km			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	15,0	13,8	12,5
Redução total da energia na bateria (kWh)	2,26	2,06	1,87
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,00		
K_{fuel}	0,00		
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,00		

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 80%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	55,4	56,7	53,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	4,16	4,25	4,02
Consumo elétrico (kWh/100 km)	3,08	3,15	2,98
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	1,54	1,31	1,19

WLTC 25 km			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	29,3	27,5	25,0
Redução total da energia na bateria (kWh)	2,26	2,06	1,87
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	0,15	0,00	
K_{fuel}	0,01	0,00	
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	0,18	0,00	

Tabela 26 – Resultados das simulações, no modo CD, para um SoC de 20%, e massas do veículo de 1 200 kg, 1 100 kg e 1 000 kg, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

a)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-2,6	-2,0	-1,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,38	-0,30	-0,25
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-2,56	-1,97	-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,95	2,57	2,45
Consumo total do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	3,06	2,80	2,54

b)

WLTC x1 (Distância de 15 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-5,1	-3,9	-3,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,38	-0,30	-0,25
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-2,56	-1,97	-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,95	2,57	2,45
Consumo total do <i>range extender</i> sem baterias (L/100 km)	3,06	2,80	2,54

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-7,7	-5,9	-5,1
Redução total da energia na bateria (kWh)	-1,15	-0,89	-0,76
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-2,56	-1,97	-1,70
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,95	2,57	2,45
Autonomia elétrica em modo CD (km)	3,06	2,80	2,54

WLTC x3 (Distância de 45 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-4,7	-1,5	-2,6
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,35	-0,11	-0,20
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,78	-0,25	-0,44
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,54	2,20	2,16
Autonomia elétrica em modo CD (km)	3,06	2,80	2,54

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-6,5	-5,9	-3,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,97	-0,89	-0,56
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,72	-0,66	-0,42
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,51	2,27	2,13
Autonomia elétrica em modo CD (km)	3,09	2,82	2,56

WLTC x9 (Distância de 135,1 km e SoC de 20%)			
Capacidade da bateria (kWh)	7,5		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-0,4	-3,8	-8,8
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,03	-0,29	-0,66
Consumo elétrico (kWh/100 km)	-0,02	-0,21	-0,49
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	2,38	2,17	2,15
Autonomia elétrica em modo CD (km)	3,09	2,82	2,56

WLTC 25 km			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-5,5	-4,3	-3,7
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,83	-0,65	-0,56
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	3,17	2,79	2,65
K_{fuel}	0,27	0,26	0,27
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,95	2,62	2,49

WLTC 25 km			
Capacidade da bateria (kWh)	15		
Massa do veículo (kg)	1 200	1 100	1 000
Redução total do SoC da bateria (%)	-6,8	-8,6	-7,4
Redução total da energia na bateria (kWh)	-0,51	-0,65	-0,56
Consumo total do <i>range extender</i> (L/100 km)	3,02	2,79	2,65
K_{fuel}	0,26	0,26	0,27
Consumo corrigido para o maior SoC (L/100 km)	2,89	2,62	2,49

Tabela 27 – Correção do consumo feita de acordo com o método normalizado para veículos europeus no modo CS, para um SoC inicial de 20%, relativos às massas do veículo de 1 200 kg, 1 100 kg e 1 000 kg, para uma capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

Fator de Utilidade (UF)	0,94	0,95	0,96
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)	0,18	0,13	0,10
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)	4,08	3,03	2,31

a)

Fator de Utilidade (UF)	0,83	0,85	0,86
Estimativa do consumo oficial (L/100 km)	0,49	0,39	0,35
Estimativa das emissões de CO ₂ oficiais (g/km)	11,35	9,09	8,07

b)

Nas simulações referentes à massa do veículo constatou-se que, no modo CD, presente na **Figura 58 a** e **Figura 59 a**, para 1 ciclo WLTC, o extensor de autonomia, tal como aconteceu em todas as simulações até aqui realizadas, nunca entrou em funcionamento, dado que o SoC mínimo para ativação do RE (20%) nunca foi atingido. Em relação à potência elétrica necessária pelo motor, esta nunca excedeu a potência da bateria, razão pela qual o RE não precisou ser ligado. É possível visualizar que as diferenças observadas se prenderam com o estado de carga da bateria, que diminuiu com a diminuição da capacidade total da bateria.

Na **Figura 58 b** e **Figura 59 b**, apresentam-se os gráficos para o modo CS, que é ativado quando o SoC cai abaixo de 20%. No ciclo WLTC estendido, o extensor de autonomia entrou em funcionamento durante alguns períodos a uma potência constante correspondente à configuração ECO. O estado de carga da bateria oscilou entre 20% e 30%, carga a partir da qual o modo elétrico voltou a entrar em funcionamento.

Para o modo CD (1 ciclo WLTC), o consumo elétrico para uma capacidade da bateria de 15 kWh variou entre os 8,78 kWh/100 km, com este a ser o maior consumo elétrico obtido em todos os ensaios efetuados, e os 7,28 kWh/100 km, com o consumo a diminuir ao ser considerado uma massa do veículo inferior, como seria de esperar, uma vez que quanto menor a massa a mover, menos energia é necessário despendar. Para a capacidade total da bateria de 7,5 kWh, observa-se que as diferenças registadas se prenderam o consumo elétrico para uma massa de 1 200 kg, na qual o valor baixou para 8,58 kWh/100 km, mantendo-se os consumos elétricos para as restantes massas do veículo. Além do consumo elétrico, também há variações no SoC inicial e final e na energia da bateria inicial e final, com estes parâmetros a baixarem dos 8,8% (1,32 kWh) para 7,3% (1,09 kWh), nos ensaios para a capacidade de 15 kWh, subindo para 7,5 kWh de capacidade, com valores entre os 17,2% (1,29 kWh) e 14,6% (1,09 kWh).

Em 3 ciclos WLTC, os valores dos consumos elétricos foram iguais ao obtido no ciclo anterior e para as respetivas capacidades totais da bateria. A diferença entre 1 e 3 ciclos WLTC residiu na bateria inicial e final que para 3 ciclos WLTC passou a variar de 26,3% a 21,8%, correspondente a um decréscimo na energia da bateria, de 3,95 kWh para 3,28 kWh, para 15 kWh de capacidade da bateria, e de 51,5% a 43,7% (7,5 kWh), com perdas de energia na bateria de 3,86 kWh a 3,28 kWh.

Ao considerar 9 ciclos WLTC, as diferenças no consumo elétrico são mais perceptíveis, havendo uma inversão da tendência de decréscimo dos consumos com a diminuição do peso, com estes a oscilarem entre 6,10 kWh/100 km e 6,53 kWh/100 km, para 15 kWh de capacidade da bateria. Contudo nas

simulações referentes a 7,5 kWh de capacidade da bateria, o consumo elétrico variou entre 3,08 kWh/100 km e 2,98 kWh/100 km. O aumento do consumo elétrico registrado para 15 kWh de capacidade deveu-se à potência de propulsão e à energia fornecida pela bateria que aumentou com o aumento do peso, correspondente aos ensaios em que foi aplicada a maior potência máxima da bateria (60 kW), a qual excedeu largamente a potência máxima do motor elétrico (30 kW), o que já não ocorreu para 7,5 kWh de capacidade em que as potências da bateria e do motor elétrico foram iguais (30 kW).

Relativamente aos valores do consumo total de combustível do RE em conjunto com a bateria, foram nulos para ambas as capacidades da bateria, quando se consideraram 1 e 3 ciclos WLTC, com exceção do ensaio para 7,5 kWh de capacidade e 1 200 kg de massa do veículo, no qual o consumo foi de 0,13 L/100 km. Passando para a análise a 9 ciclos WLTC, os valores deste parâmetro registaram um decréscimo ao diminuir-se a massa do veículo, oscilando entre 0,70 L/100 km e 0,19 L/100 km para 15 kWh de capacidade e entre 1,54 L/100 km e 1,19 L/100 km para a capacidade de 7,5 kWh. Os consumos com o uso exclusivo do extensor de autonomia variaram entre 3,06 L/100 km e 2,54 L/100 km para 1 e 3 ciclos WLTC, subindo ligeiramente para valores entre 3,09 L/100 km e 2,56 L/100 km quando a análise foi feita para 9 ciclos.

Além dos consumos também se analisou a evolução da autonomia elétrica com a variação da massa do veículo. Para uma capacidade total da bateria de 15 kWh, verificou-se que a autonomia elétrica aumentou com a diminuição da massa do veículo, iniciando em 136,7 km até um máximo de 164,9 km obtidos para 1 000 kg, o que era esperado, fruto do menor consumo elétrico anteriormente obtido para esta massa. Já para 7,5 kWh de capacidade total da bateria, os valores da autonomia elétrica diminuíram, em consequência da menor capacidade útil no modo CD (6,0 kWh), variando entre 69,9 km (1 200 kg) e 82,4 km (1 000 kg).

No modo CS, na análise de 1 ciclo WLTC, tal como foi tendência nos ensaios anteriores, registaram-se ganhos no consumo elétrico, que variaram entre 1,70 kWh/100 km e 2,56 kWh/100 km, com o valor máximo a ocorrer para 1 200 kg, em ambas as capacidades da bateria. O parâmetro que distingue ambas as capacidades são os ganhos de carga e capacidade da bateria, que foram de 1,7% (0,25 kWh) a 2,6% (0,38 kWh) para 15 kWh e de 3,4% (0,25 kWh) a 5,1% (0,38 kWh) para 7,5 kWh. Quanto aos consumos de combustível, os valores variaram entre 2,95 L/100 km para 1 200 kg até 2,45 L/100 km para 1 000 kg, em ambas as capacidades da bateria, no que diz respeito ao RE + bateria.

Em relação aos resultados para 3 ciclos WLTC, os ganhos de energia foram iguais aos registados para 1 ciclo WLTC e 15 kWh de capacidade, variando os ganhos no SoC e na energia da bateria, com os

valores a serem de 7,7% (1,15 kWh) a 5,1% (0,76 kWh). Quando se simulou a capacidade de 7,5 kWh, para 1 200 kg os ganhos no consumo elétrico baixaram para 0,78 kWh/100 km e 0,44 kWh/100 km, para 1 000 kg de massa do veículo. Nos consumos de combustível do RE em conjunto com a bateria, os valores variaram entre 2,95 L/100 km para 15 kWh de capacidade e 1 200 kg de massa e 2,16 L/100 km para 7,5 kWh de capacidade da bateria e 1 000 kg. Os consumos de combustível para o RE em exclusivo variaram entre 2,54 L/100 km (1 000 kg) e 3,06 L/100 km (1 200 kg), tanto para 1 como para 3 ciclos WLTC.

Nos ensaios para 9 ciclos WLTC, há uma diminuição do consumo elétrico, com variações desde 0,02 kWh/100 km (ganho de energia na bateria de 0,03 kWh) para 1 200 kg, correspondente a 7,5 kWh de capacidade total da bateria, até 0,72 kWh/100 km (ganho de energia na bateria de 0,97 kWh) para 1 200 kg e capacidade de 15 kWh. O consumo total do RE + bateria máximo foi registado para 15 kWh de capacidade e 1 200 kg, com um valor de 2,51 L/100 km. O valor mínimo registou-se igualmente para esta capacidade, mas para 1 000 kg, com um consumo de 2,13 L/100 km.

No consumo não corrigido (ciclo de 25 km), o valor máximo registado foi de 3,17 L/100 km, quando se considerou 1 200 kg de massa do veículo e 15 kWh de capacidade, ao passo o valor mínimo ocorreu em ambas as capacidades da bateria consideradas e para 1 000 kg, com um consumo de 2,65 L/100 km. No consumo corrigido, o valor mínimo foi obtido para 1 000 kg em ambas capacidades (2,49 L/100 km), enquanto o consumo máximo ocorreu para 1 200 kg de funcionamento do RE e capacidade da bateria de 15 kWh, com um valor de 2,95 L/100 km. Com os valores do consumo corrigido foi possível determinar as emissões corrigidas de CO₂, com estas a variarem entre 57,6 g/km (1 000 kg em ambas as capacidades) e 68,1 g/km para 1 200 kg e 15 kWh de capacidade.

Por último, ao analisar a estimativa do consumo e das emissões oficiais, o valor de UF variou entre 0,96 e 0,83, o que permitiu obter estimativas de consumo oficial entre 0,10 e 0,49 L/100 km, com o menor consumo a acontecer para 1 000 kg de massa do veículo e 15 kWh de capacidade da bateria, e o maior consumo a ser registado para a menor capacidade total da bateria e 1 200 kg. No consumo oficial, para 15 kWh, os valores variaram entre 2,31 g/km e 4,08 g/km, e entre 8,07 g/km e 11,35 g/km, para 7,5 kWh de capacidade.

6.2 AVL Cruise

Após a modelação do veículo, tal como apresentado no subcapítulo 5.2.1. e ilustrado na **Figura 50**, procederam-se às simulações, partindo das mesmas premissas usadas no Excel, relativamente ao

parâmetros a avaliar em cada simulação. De referir que, no entanto, não foi possível simular todas as variáveis tidas em consideração na folha Excel, pelo que apenas foram analisadas as variáveis:

- capacidade total da bateria (15 kWh, 12,5 kWh, 10 kWh e 7,5 kWh) para uma massa do veículo de 1 000 kg;
- estado de carga da bateria (SoC) para 100%, 80%, 50% e 20% para uma massa do veículo de 1 000 kg;
- massa do veículo (1 000 kg, 1 100 kg e 1 200 kg para as capacidades totais da bateria analisadas anteriormente).

À semelhança do que aconteceu nas simulações efetuadas no ficheiro Excel, no AVL Cruise também foi considerado o ciclo WLTC classe 3a, com as 3 fases consideradas anteriormente no modelo Excel (*Low, Medium e High* e), tal como é apresentado na **Figura 60**:

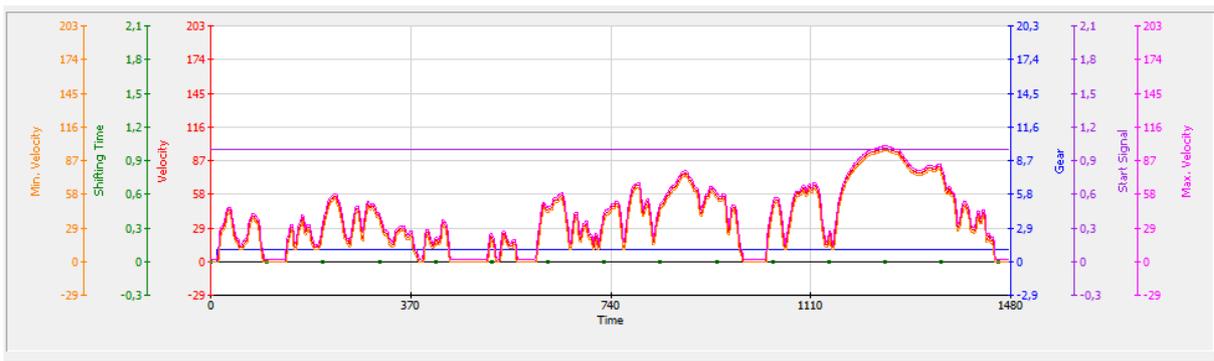


Figura 60 – Perfil, em função do tempo, do ciclo WLTC para veículos da classe 3a.

As principais características do procedimento de teste WLTC são [71]:

- distância total de 15,01 km;
- duração de 1 477 s;
- velocidade média de 36,6 km;
- velocidade máxima de 97,4 km/h.

Os resultados apresentados abaixo serão referentes apenas a 1 ciclo WLTC, pois não se registaram alterações significativas na simulação para múltiplos ciclos.

6.2.1. Capacidade total da bateria

Na análise da capacidade total da bateria, tal como sucedeu com as simulações em Excel, consideraram-se as capacidades totais da bateria entre 15 e 7,5 kWh, com intervalos de 2,5 kWh entre cada valor da capacidade admitido e para um estado de carga inicial de 80% e 20%, pelas razões enunciadas no subcapítulo 6.1.1.

A potência máxima do motor elétrico foi de 21 kW, correspondente ao valor máximo presente na curva de teste fornecida fabricante do *kit* adotado (ver **Figura 99**). Os parâmetros de entrada referentes à capacidade total da bateria encontram-se presentes na **Tabela 49**, com os valores da capacidade total da bateria convertidos em *Ah*.

Após a seleção dos parâmetros referentes à capacidade total da bateria, procedeu-se à simulação dos mesmos (ver **Anexo O1**), obtendo-se o consumo geral, tanto para o motor elétrico como para o motor térmico, para o estado de carga de 20% (**Tabela 28 a**) e 80% (**Tabela 28 b**):

Tabela 28 – Consumos elétrico e de combustível para 7,5 kWh de capacidade da bateria, 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

Massa do veículo	1 000 kg	Massa do veículo	1 000 kg
Consumo do motor de combustão	2,20 L/100 km	Consumo do motor de combustão	0,00 L/100 km
Consumo do motor elétrico + gerador	- 6,11 kWh/100 km	Consumo do motor elétrico + gerador	12,60 kWh/100 km
a)		b)	

Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se que, para o modo CD (80%), o valor obtido relativo ao consumo elétrico foi de 12,60 kWh/100 km, ao longo das várias capacidades totais da bateria, pelas razões referidas no início do subcapítulo. Com o aumento da capacidade total da bateria, constatou-se que houve um aumento do SoC final, bem como da variação do SoC inicial/final, o que é justificado pela maior capacidade da bateria, que fez com que houvesse uma diminuição na taxa de descarga (de 24,04% para 11,89%). No que respeita à autonomia elétrica no modo CD, variou entre 59,5 km (7,5 kWh de capacidade) e 119,0 km (15 kWh de capacidade).

Relativamente ao modo CS (20%), tendência registada foi de diminuição do valor final do SoC com o aumento da capacidade total da bateria (de 25,16% para 22,58%). A nível de consumos energéticos registaram-se ganhos de energia para 1 ciclo WLTC (6,11 kWh/100 km), devido ao funcionamento do veículo que vai carregando a bateria com o *range extender*. Os consumos de combustível para 1 ciclo WLTC mantiveram-se constantes, sendo de 2,20 L/100 km. A manutenção do valor do consumo de

O consumo de energia fixou-se nos 12,60 kWh/100 km, pelo que a autonomia elétrica variou entre 59,5 km e 119,0 km.

Já no modo CS, alterou-se a tendência registada no modo CD, registando-se a diminuição do valor final do SoC, com o aumento da capacidade total da bateria (de 25,16% para 22,58%). A nível de consumos energéticos registaram-se ganhos de energia para 1 ciclo WLTC (6,11 kWh/100 km), devido à pouca oscilação entre o SoC inicial e final (RE é a principal fonte de eletricidade). Os consumos de combustível para 1 ciclo WLTC mantiveram-se constantes, sendo de 2,20 L/100 km, pelas razões anteriormente apresentadas.

6.2.3. Massa do veículo

Na análise da massa do veículo, as simulações tiveram em consideração a massa em vazio do veículo com valores entre 1 000 kg e 1 200 kg.

De modo a seguir os mesmos critérios usados nas simulações em Excel, apenas se consideraram as capacidades mínima e máxima (7,5 kWh e 15 kWh) e os SoC iniciais de 20% e 80%.

Efetuada as simulações descritas no **Anexo 03**, obteve-se o consumo geral, tanto para o motor elétrico como para o motor térmico, para as diferentes massas do veículo consideradas nas simulações, para estado de carga de 20% (**Tabela 30**) e 80% (**Tabela 31**).

Tabela 30 – Consumos elétrico e de combustível para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: 7,5 kWh e 15 kWh.

Massa do veículo	1 000 kg
Consumo do motor de combustão	2,20 L/100 km
Consumo do motor elétrico + gerador	- 6,11 kWh/100 km
Massa do veículo	1 100 kg
Consumo do motor de combustão	2,20 L/100 km
Consumo do motor elétrico + gerador	- 5,72 kWh/100 km

Massa do veículo	1 200 kg
Consumo do motor de combustão	2,20 L/100 km
Consumo do motor elétrico + gerador	- 5,34 kWh/100 km

Tabela 31 – Consumos elétrico e de combustível para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

Massa do veículo	1 000 kg
Consumo do motor de combustão	0,00 L/100 km
Consumo do motor elétrico + gerador	12,60 kWh/100 km

Massa do veículo	1 100 kg
Consumo do motor de combustão	0,00 L/100 km
Consumo do motor elétrico + gerador	12,97 kWh/100 km

Massa do veículo	1 200 kg
Consumo do motor de combustão	0,00 L/100 km
Consumo do motor elétrico + gerador	13,35 kWh/100 km

Após a obtenção dos resultados para o parâmetro relativo à massa do veículo, constata-se que para o modo CD (80%), o valor obtido relativo ao consumo elétrico variou entre 12,60 kWh/100 km para 1 000 kg e 13,35 kWh/100 km para 1 200 kg, pelo que o consumo elétrico aumenta com o aumento da massa do veículo, como era expectável. Ao aumentar a massa do veículo, para uma capacidade da bateria de 7,5 kWh, o estado de carga final da bateria diminuiu (de 55,96% para 54,47%), dada a maior massa a mover, que provoca um maior dispêndio de energia, valores que aumentaram ligeiramente ao considerar 15 kWh de capacidade (variação entre 68,11% e 67,38%). A autonomia elétrica registada no modo CD, variou entre 56,1 km (registada quando se considerou uma massa de 1 200 kg e capacidade total da bateria de 7,5 kWh) e 119,0 km (registada quando se considerou uma massa de 1 000 kg e capacidade total da bateria de 15 kWh).

Passando para o modo CS, manteve-se a tendência registada no modo CD, de diminuição do valor

final do SoC, com o aumento da massa do veículo (variou entre 25,16% e 23,61%), subindo a carga na bateria ao aumentar capacidade total da bateria (variou entre 22,58% e 21,80%). A nível de consumos energéticos registaram-se ganhos de energia inversamente proporcionais ao aumento da massa do veículo (6,11 kWh/100 km para 1 000 kg e 5,34 kWh/100 km para 1 200 kg). Os consumos de combustível para 1 ciclo WLTC mantiveram-se constantes, sendo de 2,20 L/100 km, pelas razões anteriormente apresentadas.

6.3 Comparação de resultados

Neste subcapítulo será apresentada uma comparação entre os valores máximos obtidos na folha Excel e no *software* AVL Cruise, de forma a avaliar as diferenças obtidas entre os dois métodos de obtenção de consumos. A comparação será feita apenas entre os parâmetros que foram simulados em ambos os software, para 1 ciclo WLTC, como mostra a **Tabela 32**:

Tabela 32 – Variação dos consumos máximos entre a folha Excel e o AVL Cruise.

Parâmetro simulado		Excel	AVL Cruise	Variação (%)
Capacidade total da bateria	Consumo de combustível (L/100 km)	2,45	2,20	-10,2
	Consumo elétrico (kWh/100 km)	7,28	12,60	+42,2
Estado de carga da bateria (SoC)	Autonomia elétrica no modo CD (km)	164,9	119,0	-27,8
Massa do veículo	Consumo de combustível (L/100 km)	3,06	2,20	-28,1
	Consumo elétrico (kWh/100 km)	8,78	13,35	+34,2
	Autonomia elétrica no modo CD (km)	164,9	119,0	-27,8

Da tabela anterior, é de salientar que o resultado destas ferramentas de simulação dependem muito da modelação que se faça do motor. Assim, não se pode concluir que um seja melhor que o outro com base apenas nos resultados obtidos, dado os poucos dados de funcionamento do *kit* fornecidos pelo fabricante.

Apesar de todas as condicionantes que interferiram com os resultados obtidos verifica-se que a

configuração que melhor permite conciliar o menor consumo elétrico e de combustível a uma maior autonomia ocorre para um capacidade total da bateria de 7,5 kWh, potência máxima da bateria de 15 kW e massa do veículo de 1 000 kg. Observando os resultados obtém-se um consumo elétrico de 7,28 kWh/100 km, consumo de combustível de 2,45 L/100 km e autonomia em modo elétrico de 164,9 km.

7. ANÁLISE DOS CUSTOS

No capítulo anterior foram obtidos os consumos elétrico e de combustível para diversos parâmetros. Neste capítulo será feita uma análise dos custos relativos ao preço do combustível e preço da energia elétrica (para uma potência contratada de 3,45 kVA), que se aplicam aos veículos convencionais e elétricos, respetivamente, seguido do valor que seria investido na conversão. Também se fará uma previsão da amortização do investimento inicial até 2030.

A **Tabela 33** mostra os parâmetros que foram considerados na análise de custos:

Tabela 33 – Parâmetros considerados na análise de custos.

Modo de mobilidade	Parâmetros
Gasolina sem chumbo 95 (antes da conversão)	Preço (€/litro)
	Distância média diária (km)
	Consumo médio de combustível (L/100 km)
	Capacidade do depósito (L)
Gasolina sem chumbo 95 (gerador) + Energia elétrica (após conversão)	Preço (€/kWh)
	Distância média diária (km)
	Consumo médio de energia (kWh/100 km)
	Energia armazenada no <i>pack</i> de baterias (kWh)

Devido à constante variação dos preços dos combustíveis (várias vezes ao ano), e do aumento dos preços das tarifas de energia (anual), recorreu-se à informação disponibilizada no *site* da ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos), relativa ao final do ano de 2021 [72] [73].



Figura 61 – Preço médio da gasolina simples 95 praticado em Portugal em dezembro de 2021 [72].

Tabela 34 – Preço médio da eletricidade (tarifa simples) praticado em Portugal em dezembro de 2021 [73].

TARIFA TRANSITÓRIA DE VENDA A CLIENTES FINAIS EM BTN ($\leq 20,7$ kVA e $> 2,3$ kVA)			PREÇOS	
Potência contratada			(EUR/mês)	(EUR/dia) *
Tarifa simples, bi-horária e tri-horária		3,45	5,37	0,1765
		4,6	6,99	0,2298
		5,75	8,60	0,2827
		6,9	10,21	0,3357
		10,35	15,05	0,4948
		13,8	19,88	0,6536
		17,25	24,72	0,8127
	20,7	29,55	0,9715	
Energia ativa			(EUR/kWh)	
Tarifa simples			0,1466	
Tarifa bi-horária	Horas de fora de vazio		0,1808	
	Horas de vazio		0,0913	
Tarifa tri-horária	Horas de ponta		0,2242	
	Horas cheias		0,1582	
	Horas de vazio		0,0913	

Um outro parâmetro importante para o estudo, que consta na **Tabela 33**, corresponde ao consumo de energia (kWh/100Km) que o veículo elétrico possui. Para o veículo em causa, o valor estimado do consumo de combustível e elétrico teve em consideração consumo registado, a partir dos valores obtidos no modelo Excel, pelo que os valores obtidos foram de 2,45 L/100 km e 7,28 kWh/100 km, respetivamente.

Relativamente à distância média diária, foi considerada a autonomia pretendida como premissa do projeto (100 km).

A **Tabela 35** apresenta toda a informação constante na **Tabela 33**, à qual foi adicionada os valores dos parâmetros que não variam de ano para ano.

Tabela 35 – Parâmetros considerados na análise de custos relativos a dezembro de 2021 (inclui valores dos parâmetros fixos).

Modo de mobilidade	Parâmetros	
Gasolina sem chumbo 95 (antes da conversão)	Preço (€/litro)	1,720
	Distância média diária (km)	100
	Consumo médio de combustível (L/100 km)	4,80
	Capacidade do depósito (L)	35
Gasolina sem chumbo 95 (gerador) + Energia elétrica (após conversão)	Preço (€/kWh)	0,1466
	Distância média diária (km)	100
	Consumo médio de combustível (L/100 km)	2,45
	Consumo médio de energia (kWh/100 km)	12,60
	Capacidade do depósito (L)	6
	Energia armazenada no <i>pack</i> de baterias (kWh)	10

Com base na informação presente na **Figura 61** e nas **Tabela 34** e **Tabela 35**, foram efetuados cálculos com o objetivo de efetuar a análise dos custos da conversão do veículo citadino tradicional para a propulsão elétrica com extensor de autonomia. Tal como referido anteriormente, os valores apresentados referem-se ao custo anual, com base nos valores no final do ano de 2021.

O veículo original tinha uma capacidade do depósito de gasolina que rondava os 35 L. Com um consumo de 4,80 L/100km [54], e assumindo que o condutor atestava o depósito cada vez que se dirigia ao posto de abastecimento, o veículo percorria 729,2 km. Tendo em conta a distância média diária de 100 km, conclui-se que um depósito durava cerca de 7,3 dias. Na prática, este valor de significa que o condutor quando entrava no oitavo dia, apenas possui 1,4 L de gasolina, pelo que apenas conseguia percorrer cerca de 29 Km. Sendo assim, o depósito de combustível era atestado 5 vezes por mês, ou seja, 60 vezes por ano.

Posto isto, anualmente eram gastos:

$$35 \text{ (litros depósito gasolina)} \times 60 \text{ (n}^\circ \text{ de vezes depósito atestado)} = 2\,100 \text{ L}$$

Para o mês de dezembro de 2021, o preço médio da gasolina simples 95 foi de 1,720 €/litro, logo o custo relativo ao combustível considerado para o ano de 2022, dado que a taxa de inflação em 2022 foi de 1,3% [74], seria de:

$$2\,100 \text{ L} \times 1,742 \text{ €/litro} = 3\,658,20 \text{ €/ano}$$

Para o veículo convertido, os cálculos a realizar são semelhantes aos anteriormente descritos, no entanto a capacidade do depósito do gerador era de 6 L e o consumo de combustível de 2,45 L/100 km. Assim sendo, com o depósito cheio o veículo percorria cerca de 245 Km, permitia uma utilização durante cerca de 2,5 dias, logo por mês tinha de ser atestado 12 vezes, totalizando 144 vezes por ano.

Anualmente eram despendidos cerca de 2880 litros de GPL conforme demonstra a expressão abaixo, tendo em conta que:

$$6 \text{ L (depósito do gerador)} \times 144 \text{ (n}^\circ \text{ de vezes depósito atestado)} = 864 \text{ L}$$

Calculando novamente o custo relativo ao combustível considerado para o ano de 2022, tendo em conta o preço médio da gasolina simples 95 e a taxa de inflação para 2022:

$$864 \text{ L} \times 1,742 \text{ €/litro} = 1\,505,09 \text{ €/ano}$$

Uma vez determinado o custo do combustível para o ano de 2022, torna-se necessário prosseguir com os cálculos para se saber os custos das tarifas da eletricidade consideradas.

Dado que o conjunto de baterias do *kit* considerado totalizava 10 kWh, para uma potência máxima da bateria de 30 kW, estado de carga inicial da bateria de 80%, e atendendo ao consumo estimado de 7,28 kWh/100 km, obteve-se o valor da autonomia em modo elétrico de 137,36 km, pelo que ainda seria possível percorrer em modo elétrico durante mais 37,36 km. Entrando em linha de conta com a distância média diária de 100 km, e considerando o rendimento de carregamento, afetado do rendimento de carregamento, que usualmente é de cerca de 90%, obtém-se:

$$\frac{10}{0,9} = 11,1 \text{ kWh}$$

seria necessário proceder ao carregamento das baterias a cada 2 dias, pelo que seriam 180 carregamentos anuais (30 carregamentos mensais), pelo que eram gastos:

$$11,1 \times 180 = 1\,998 \text{ kWh}$$

A partir do custo da tarifa simples de eletricidade para o ano de 2021, fixado em 0,1466 €/kWh [73], a que acresce a taxa de inflação, o custo anual para a tarifa simples, no ano de 2022, seria de:

$$1\,998 \times 0,1485 = 296,70 \text{ €/ano}$$

Relativamente ao custo da eletricidade para a tarifa bi-horária (fora de vazio e vazio), basta apenas variar o preço da energia, uma vez que a energia consumida é igual, logo obtém-se:

$$1\,998 \times 0,1832 = 366,03 \text{ €/ano (fora do vazio)}$$

$$1\,998 \times 0,0925 = 184,82 \text{ €/ano (vazio)}$$

O valor da poupança alcançada efetuou-se utilizando a diferença de custos para cada um dos casos. A título de exemplo, a poupança estimada para o ano de 2022 quando se compara o custo da gasolina antes da conversão do veículo com o custo da gasolina e da eletricidade (tarifa simples) após a conversão:

$$\begin{aligned} &3\,658,20 \text{ € (custo antes da conversão)} - (1\,505,09 \text{ €} + 296,70 \text{ €}) \text{ (custo após a conversão)} \\ &= 1\,856,41 \text{ €/ano} \end{aligned}$$

No **Anexo P** encontram-se detalhados os custos da conversão do veículo, tendo-se obtido um custo final de 17 471,24 €. Este valor teve em conta o custo de um modelo do Citroën C1 [139], bem como o *kit* de conversão considerado que foi ao encontro dos objetivos de obter uma potência do motor elétrico a rondar os 10 kW e uma capacidade total da bateria próxima dos 10 kWh [57]. Ainda é descrito o custo do gerador elétrico considerado [58], que acoplado a um motor a gasolina pertencente a um gerador a gasolina [140] de modo a funcionar como *range extender*.

No cálculo do valor remanescente a amortizar em 2022, entrou-se em linha de conta com o valor do investimento inicial, ao qual se adicionou o valor da poupança obtida nesse mesmo ano em cada caso. A título de exemplo, abaixo apresenta-se o valor a amortizar em 2022 para o caso da gasolina e electricidade (tarifa simples):

$$\begin{aligned} &- 17\,471,24 \text{ € (conversão)} + 1\,856,41 \text{ € (poupança alcançada antes da conversão} \rightarrow \text{ após a conversão)} \\ &= -15\,614,83 \text{ €} \end{aligned}$$

Devido ao facto do cálculo do valor remanescente a amortizar diferir de ano para ano, procedeu-se ao cálculo do valor amortizado até ao ano de 2 030. Para tal considerou-se um acréscimo anual do custo da gasolina e da tarifa simples da eletricidade, com base na taxa de inflação de 2021.

Para 2023 considerou-se a parcela referente ao valor a amortizar para o ano de 2022 em cada caso, e adicionou-se o valor da poupança obtida também para cada caso no ano de 2023.

Como exemplo, em 2023 o valor a amortizar para o caso gasolina e electricidade (tarifa simples) será de -13 733,79 €, de acordo com a expressão seguinte:

$$\begin{aligned} & - 15\,614,83 \text{ € (conversão)} + 1\,881,04 \text{ € (poupança alcançada antes da conversão} \rightarrow \text{após a conversão)} \\ & = -13\,733,79 \text{ €} \end{aligned}$$

Com base nas informações fornecidas pelo fabricante, as baterias permitem efetuar cerca de 1 500 ciclos completos, ou seja, são:

$$1\,500 \text{ (n}^\circ \text{ de ciclos das baterias)} * 10 \text{ kWh (capacidade total da bateria)} = 15\,000 \text{ kWh}$$

Posto isto foi necessário ver quantos kWh são carregados por dia (quanta electricidade é que o utilizador tem de carregar no carro). Dado este fator ser mais complicado de obter, pois depende da percentagem do tempo de viagem em que viaja em CD e CS, assumiu-se que o utilizador usaria o carro diariamente durante 1h, e nesse período, o modo CD estaria a ser usado 90% da duração das viagens diárias, o que perfaz uma duração de 50 minutos.

Como parte dos 7,28 kWh/100 km obtidos de consumo elétrico do carro provêm do extensor de autonomia (que se assumiu será 10% do consumo), então serão gastos, como visto anteriormente,

$$\begin{aligned} & 7,28 \text{ kWh/100 km (consumo elétrico em modo CD)} \times 0,9 \text{ (% de tempo em modo CD)} \\ & = 6,55 \text{ kWh/100 km} \end{aligned}$$

É então necessário carregar diariamente 4,55 kWh, até atingir os 11,1 kWh do carregamento completo, como foi visto acima.

A duração das baterias é então de:

$$\frac{1\,500 \times 10 \text{ kWh (n}^\circ \text{ de carregamentos completos)}}{4,55 \times 365 \text{ (n}^\circ \text{ de kWh carregados diariamente)}} = 9 \text{ anos}$$

Deste modo, no ano de 2025 as baterias terão atingido o fim da sua vida útil, devendo proceder-se à substituição das mesmas, conforme assinalado na **Tabela 79** do **Anexo Q**.

A partir dos preços fornecidos no *kit* de conversão, é possível obter o custo do *pack* de baterias no ano de 2021, com o preço a fixar-se nos 2 303,50 €, ao câmbio de 31 de dezembro de 2021. No entanto, quando as baterias atingirem o fim da sua vida útil não é expectável que o preço das mesmas seja o referido anteriormente. Ainda assim, para efeitos de estudo, optou-se por efetuar os cálculos do valor a amortizar entrando com o preço atual das baterias. Deste modo, para o ano de 2030 considerou-se a parcela referente ao valor a amortizar para o ano de 2029 em cada caso, e adicionou-se o valor da poupança obtida também para cada caso no ano de 2030 e o preço das novas baterias a colocar no

veículo.

Como exemplo, em 2030, o valor a amortizar para o caso gasolina e electricidade (tarifa simples) será de -2 168,33 €, de acordo com a expressão:

$$\begin{aligned} & - 1\,923,71 \text{ € (valor a amortizar em 2029)} \\ & +2\,058,88 \text{ € (poupança alcançada antes da conversão → após a conversão)} \\ & - 2\,303,50 \text{ € (preço das baterias)} \\ & = -2\,168,33 \text{ €} \end{aligned}$$

Posto isto, ainda na **Tabela 79 do Anexo Q**, apresenta-se o custo relativo ao combustível para o veículo normal (gasolina) e o veículo convertido (gasolina + electricidade), tendo por base os preços extrapolados até ao ano de 2030, com base na taxa de inflação verificada em 2021 e para as diferentes tarifas de electricidade existentes (simples, fora do vazio e vazio). Na mesma tabela consta ainda a poupança alcançada, bem como a evolução do valor a amortizar referente à conversão do veículo e preços das novas baterias nesse mesmo período, face ao tipo de combustível que o veículo podia utilizar antes de ser convertido.

Observando a referida tabela verifica-se que para a tendência estabelecida, o preço previsto por litro de gasolina nos próximos dez anos irá continuar a ser bastante superior comparativamente ao preço do kWh da electricidade.

Relativamente ao valor a amortizar, de notar que o mesmo depende não só dos cálculos anteriormente descritos, mas também do investimento inicial e do custo de substituição das baterias no fim da sua vida útil. Quanto à primeira situação em concreto, o valor da conversão foi de 17 471,24 €, revelando-se bastante elevado e prolongando assim o tempo de recuperação do valor despendido. Juntando ao investimento inicial o custo da substituição das baterias na ordem dos 2 303,50 €, acaba por atrasar um pouco mais a recuperação do valor investido.

Observando a tendência de decréscimo do valor a amortizar, fruto do aumento da diferença entre o custo anual em gasolina e em electricidade, conclui-se que a conversão se torna viável a longo prazo, concretamente ao fim de 11 anos para a tarifa simples e bi-horária (fora do vazio) e ao fim de 10 anos para a tarifa bi-horária (vazio).

8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Na primeira parte deste capítulo são apresentadas as principais conclusões que derivaram da realização desta dissertação, nomeadamente da análise de resultados anteriores e das simulações realizadas.

Na segunda parte, são feitas algumas sugestões de trabalho futuro de modo a completar o trabalho efetuado, consolidar melhor os resultados desta dissertação e poder expandir o âmbito do trabalho a outros campos ainda não explorados.

8.1 Conclusões

O principal objetivo da presente dissertação foi analisar a conversão de um veículo citadino para a propulsão elétrica, adaptando-o para funcionar como *range extender*. Assim, iniciou-se o trabalho pela abordagem ao estado da arte, a qual permitiu de um modo geral, constatar que atualmente os veículos elétricos já apresentam desempenhos que podem em muitos casos rivalizar com os veículos com motor a combustão interna, apresentando, no entanto, como principais desvantagens uma autonomia elétrica relativamente reduzida ou custos excessivos de bateria para obter autonomias equiparáveis a veículos de combustão, um preço de aquisição elevado e elevados tempos de carregamento. Apesar destes entraves, há um forte investimento por parte da indústria automóvel na pesquisa e desenvolvimento de baterias com maiores capacidades, com novos componentes.

No que diz respeito aos motores elétricos, estes apresentam tecnologias com um grau de desenvolvimento e fiabilidade razoáveis, pelo que não se revelam um obstáculo à proliferação dos veículos elétricos. Dentro dos motores elétricos destacam-se os motores de indução, de ímanes permanentes e de corrente contínua sem escovas, no que aos principais aspetos a avaliar nos motores elétricos diz respeito. De modo a chegar a um único motor mais adaptado à aplicação em veículos elétricos, avaliou-se a faixa de utilização dos mesmos, no que à curva de velocidade – binário diz respeito, pelo que se concluiu que o motor de indução revela ser uma escolha razoável.

Quanto ao trabalho prático, iniciou-se pela pesquisa de um *kit* de conversão para veículo elétrico, tendo-se encontrado um composto pelo motor elétrico de 10 kW de potência contínua de 30 kW, controlador, caixa de velocidades, conversor CC – CC, carregador e *pack* de baterias com 12,48 kWh de capacidade. Além destes componentes também foi necessário encontrar no mercado um *range extender*, o qual consistiu num pequeno motor térmico com uma potência de 6,6 kW que seria acoplado a um gerador elétrico com uma potência de 10 kW. Na realidade, ainda não existem no mercado REs de

pequena potência adequados a este tipo de aplicação.

Após a seleção destes componentes, recorreu-se a uma folha Excel desenvolvida pelo grupo, na qual foram simulados vários ciclos WLTC, de modo a obterem-se os valores dos consumos elétricos e de combustível para 1, 3 e 9 ciclos WLTC, e assim ter uma perceção da autonomia elétrica conseguida.

Após a simulação de todas as variáveis, concluiu-se que os valores que apresentavam a melhor relação consumo elétrico/ autonomia em modo elétrico ocorreram para a capacidade total da bateria de 10 kWh, potência máxima da bateria de 30 kW, estado de carga inicial da bateria de 80%, e atendendo ao consumo médio, em modo CD, de 7,28 kWh/100km, correspondente a uma autonomia elétrica de 137,36 km.

Já nas simulações no *software* comercial AVL Cruise, foi aproveitado um modelo de veículo elétrico com *range extender*, procedendo-se às alterações necessárias para que o mesmo estivesse de acordo com os requisitos do projeto. O *software* AVL Cruise permitiu uma análise mais detalhada e criteriosa ao comportamento dos componentes, permitindo obter consumos mais próximos da realidade. O único entrave prendeu-se com o facto de não ter sido possível analisar a influência da potência máxima da bateria e do tempo mínimo de funcionamento do extensor de autonomia.

No caso do AVL Cruise, por predefinição, o *software* considera que a capacidade útil da bateria é igual à capacidade total da bateria, pelo que os consumos obtidos nas simulações para as condições desejadas (1 000 kg e 10 kWh de capacidade total da bateria) foram de 12,60 kWh/100km, o que permite percorrer 79,3 km. Ao aumentar a massa do veículo para 1 200 kg, para a capacidade total da bateria a aplicar no veículo (10 kWh), o consumo do veículo aumenta até a um máximo de 13,35 kWh/100 km, o que diminui a autonomia elétrica para 74,9 km.

Na vertente da viabilidade económica do projeto, ao efetuar a análise de custos pôde-se concluir que o preço da conversão seria elevado (17 471,24 €), o que faria com que o valor a amortizar, adicionado ao custo da substituição das baterias a cada 4 anos, na ordem dos 2 303,50 €, acabaria por atrasar um pouco mais a recuperação do valor investido. Mantendo-se a tendência de decréscimo do valor a amortizar, fruto do aumento da diferença entre o custo anual em gasolina e em eletricidade, a conversão seria viável a longo prazo, concretamente ao fim de 11 anos para a tarifa simples e bi-horária (fora do vazio) e ao fim de 10 anos para a tarifa bi-horária (vazio).

O veículo elétrico com extensor de autonomia seria uma alternativa ao veículo convencional a ter em consideração sobretudo nas deslocações diárias dentro da cidade, em que os índices de poluição são mais elevados, o que permitiria não só uma poupança no custo de funcionamento e manutenção

comparativamente a um veículo convencional, mas também no custo do estacionamento na via pública, mediante requisição do dístico verde.

8.2 Sugestões de trabalhos futuros

Concluída esta dissertação, há ainda outros caminhos por onde é possível enveredar dentro do projeto, pelo que será interessante efetuar um estudo de outros *kits* de conversão e restantes componentes necessários, tal como eventual comercialização de extensores de autonomia, os quais possuam já ensaios às prestações, consumos e emissões que permitam aferir o interesse em avançar no estudo dos mesmos, e assim diminuir o custo de aquisição em separado do gerador e motor a gasolina, bem como a análise de outras massas do veículo elétrico, de forma a aumentar a sua *performance* (mesmo com motores de baixa potência) e diminuir o consumo, o que permitiria aumentar a autonomia.

No modelo do AVL Cruise, embora complexo, foi indicado pelos desenvolvedores do programa que seria possível inserir uma expressão que tivesse em conta a influência da potência máxima da bateria e uma outra para o tempo mínimo de funcionamento do *range extender*. Com os valores obtidos no *software*, aliados às mudanças no Excel enumeradas no parágrafo anterior, permitirá fazer uma comparação mais completa entre ambos os modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LAVRADOR, Alfredo. “Vêm aí normas mais apertadas para as emissões”. Jornal “Observador”. Lisboa. 22 de junho de 2019.
Retirado da página:
<https://observador.pt/2019/06/22/vem-ai-normas-mais-apertadas-para-as-emissoes/> a 23/03/2021
- [2] FREITAS, Joaquim. “Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos”. Dissertação de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho (UM). Guimarães. Setembro de 2012.
- [3] MENDONÇA, Álvaro. “Mazda elétrico com extensor de autonomia Wankel”. *Site “Auto monitor”*. Lisboa. 10 de abril de 2017.
- [4] CASTRO, Carlos. “Desenvolvimento de um motor BMW para servir de *Range Extender*”. Dissertação de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho (UM). Guimarães. 2016.
- [5] RIBAU, J.; SILVA, C.; BRITO, F. e MARTINS, J.; “*Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders*”. *Energy Conversion and Management*, vol. 58, pp. 120 - 133. Elsevier. IDMEC/IST, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Lisboa; CT2M, Escola de Engenharia da Universidade do Minho (EEUM), Guimarães. 15 de fevereiro de 2012.
- [6] LUKASIEWYCZ, Martin et al. “*System architecture and software design for Electric Vehicles*”. DAC '13: *Proceedings of the 50th Annual Design Automation Conference*. Association for Computing Machinery. Texas, Estados Unidos da América. Maio de 2013.
- [7] ALIASAND, Arun; JOSH, F.T.; “*Selection of Motor for an Electric Vehicle: A Review*”. *Materials Today: Proceedings*, vol. 24, pp. 1804-1815. Department of Electrical and Electronics Engineering, Tamil Nadu. Índia. 2020.
- [8] AYERIDIS, Georgios. “*Electric cars: history and perspectives*”. Hellenic Institute of Electric Vehicles (HEL.I.E.V). Atenas, Grécia. Outubro de 2015.
- [9] KARKI, Abhisek et al. “*Status of Pure Electric Vehicle Power Train Technology and Future Prospects*”. *Applied System Innovation Journal*. Dhulikhel, Nepal; Massachusetts, Estados Unidos da América. 17 de agosto de 2020.
- [10] QIN, Nan. “*Electric Vehicle Architectures*”. 2016 EV & Technology Workshop. *Electric Vehicle Transportation Center (EVTC)*. Flórida, Estados Unidos da América. 17 de outubro de 2016.
- [11] MOTA, José. “Implementação de um Sistema de Carregamento Rápido para Baterias de Veículos Elétricos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrónica e de Computadores. Universidade do Minho (UM). Guimarães. Novembro de 2015.
- [12] MAGALHÃES, Bruno. “Hibridação de veículo automóvel”. Relatório do Projeto Final/ Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Porto. Fevereiro de 2014.

- [13] PINHEIRO, Carlos. “Desenvolvimento de um *Range Extender* para Veículo Elétrico”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores. Universidade do Minho (UM). Guimarães. Dezembro de 2013.
- [14] MARTINS, Jorge. “Motores de Combustão Interna”. 5ª Edição, pp. 212 - 213. Publindústria. Porto. 2016.
- [15] BRITO, Francisco et al. “Development and Assessment of an Over-Expanded Engine to be Used as an Efficiency-Oriented Range Extender for Electric Vehicles”. *Energies Journal*, vol. 13, 2ª Edição, nº 430. Mechanical Engineering and Resource Sustainability Center (MEtRICs), Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Universidade do Minho (UM), Guimarães; Center for Innovation, Technology and Policy Research (IN+), Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa. 16 de janeiro de 2020.
- [16] NOGA, Marcin. “*Application of the internal combustion engine as a range-extender for electric Vehicles*”. *Combustion Engines*, pp. 781 - 786. Cracow University of Technology. Cracóvia, Polónia. Setembro de 2016.
- [17] BLADON JETS. “*Gas Turbine World - Bladon Microturbines*”. 21 de setembro de 2018.
Retirado da página:
<http://www.gasturbineworld.co.uk/bladon.html> a 26/02/2021
- [18] CAPSTONE. *Services*.
Retirado da página:
<https://www.capstoneturbine.com/services> a 26/02/2021
- [19] HASHEMNIA, Mohammad; ASAEI, Behzad. “*Comparative study of using different electric motors in the electric Vehicles*”. *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*. Department. of Electrical and Computer Engineering, Tehran University. Teerão, Israel. 2008.
- [20] QI, Fang; SCHARFENSTEIN, Daniel; WEISS, Claude et al; “*Motor Handbook*”. Infineon Technologies AG, Institute for Power Electronics and Electrical Drives. Universidade de Aachen. Alemanha. 12 de março de 2019.
- [21] FRITZ, Caroline. “*Definition of a DC Motor*”. 21 de julho de 2017.
Retirado da página:
<https://sciencing.com/can-grease-brushes-electric-motor-7779664.html> a 26/11/2020
- [22] SAWANT, Winit *et al.* “*The Complete Guide to DC Motors*”. Linqup.
Retirado da página:
<https://www.linqup.com/landing/the-complete-guide-to-dc-motors-2/> a 26/04/2021
- [23] STOREY, John. “*Conventional DC motors*”. School of Physics. Universidade de Nova Gales do Sul (UNSW). Sidney, Austrália. 2006.
Retirado da página:
https://newt.phys.unsw.edu.au/hsc/hsc/electric_motors4.html a 27/11/2020.
- [24] AUTODESK. *Brushless DC Motor*. Japão. 17 de março de 2017.
Retirado da página:
<https://gallery.autodesk.com/projects/88134/brushless-dc-motor> a 26/04/2021

- [25] ELECTRICAL4U. “*Brushless DC Motors (BLDC): What Are They & How Do They Work?*”. 25 de outubro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.electrical4u.com/brushless-dc-motors/> a 27/04/2021
- [26] MOHTAR, A.; NEDIC, Z.; MACHOTKA, J. “*A compact and affordable BLDC motor controller for a microelectronics remote laboratory*”. *Proceedings of the 2008 International Conference on Jaedded Systems & Applications*. Nevada, Estados Unidos da América. 2008.
- [27] ELECTRICAL4U. “*Induction Motor: Working Principle, Types, & Definition*”. 15 de novembro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.electrical4u.com/induction-motor-types-of-induction-motor/> a 27/11/2020
- [28] LEE, Shiyoung; LEMLEY, Tom; KEOHANE, Gene. “*A comparison study of the commutation methods for the three-phase permanent magnet brushless DC motor*”. *Electrical Manufacturing Technical Conference 2009 (EMCWA)*. Nashville, Estados Unidos da América. 2009.
- [29] KURITA, Nobuyuki; ISHIKAWA, Takeo; SUZUKI, Genri. “*Proposal of a magnetically levitated shaded pole induction motor*”. *Mechanical Engineering Journal*. Division of Electronics and Informatics, Faculty of Science and Technology, Gunma University. Japão. 8 de dezembro de 2015.
- [30] NIKBAKSH, Amir; IZADFAR, Hamid; JAZAERI, Mostafa. “*Classification and comparison of rotor temperature estimation methods of squirrel cage induction motors*”. *Measurement*, pp. 779 - 882. Elsevier. Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University. Irão. 11 de abril de 2019.
- [31] A.J., Princy. “*Induction Motors: Main Types and Different Applications*”. *Research Dive*. 04 de junho de 2020.
Retirado da página:
<https://www.researchdive.com/blog/induction-motors-main-types-and-different-applications> a 28/11/2020
- [32] KNIGHT, Andy. “*Single-phase induction machines*”. *Schulich School of Engineering*. Universidade de Calgary. Alberta, Canadá.
Retirado da página:
https://people.ucalgary.ca/~aknigh/electrical_machines/other/spim.html a 27/11/2020
- [33] ELECTRICAL4U. “*Three Phase Induction Motor Definition & Working Principle*”. 15 de novembro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.electrical4u.com/working-principle-of-three-phase-induction-motor/> a 28/11/2020
- [34] ELECTRICAL4U. “*Advantages and Disadvantages of Induction Motor*”. 25 de outubro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.electrical4u.com/induction-motor-advantages-and-disadvantages/> a

28/11/2020

- [35] LEVKIN, Dmitry. “*Permanent magnet synchronous motor*”. Engineering Solutions. 12 de abril de 2019.
Retirado da página:
<https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/> a 28/04/2021
- [36] BOUIABADY, Mohammad; ALIABAD, Aliakbar; AMIRI, Ebrahim. “*Switched Reluctance Motor Topologies: A Comprehensive Review*”. *Switched Reluctance Motor – Concept, Control and Applications*. Intech. Universidade de Yazd. Yazd, Irão; Universidade de Nova Orleães, Los Angeles, Estados Unidos da América. 2017.
- [37] SHEWALE S., Nikhil; R., Deivanathan. “*Modelling and analysis of DC motor actuator for na electric gripper*”. *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 13, nº4, pp. 862 - 874; School of Enginnering, Taylor’s University, Selangor, Malásia. 2018.
- [38] RAMESH, M.V. et al. “*Speed Torque Characteristics of Brushless DC motor in Either Direction on Load using ARM controller*”. *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 217-222. Kerala, Índia. 2011
- [39] ZERAOULIA, Mounir; JABOUZID, Mohamed; DIALLO, Demba. “*Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study*”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 55, No.6, pp. 1756-1764. França. Novembro de 2006.
- [40] RUDNICKI, Tomasz; et al. “*Performance Analysis of a PMSM Drive with Torque and Speed Control*”. *2015 Proceedings of the 22nd International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems"*, pp. 562 - 566. Department of Microelectronics & Computer Science, Lodz University of Technology. Lodz, Polónia. 2015.
- [41] JAPE, Swaraj; THOSAR, Archana. “*Comparison of electric motors for electric vehicle Application*”. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, vol. 06, No. 09, pp. 12-17. Electrical Engineering Department, Government College of Engineering. Maharashtra, Índia. Setembro de 2017.
- [42] SLEMON, Gordon. “*Electric generator*”. Enciclopédia “Britannica”. 10 de setembro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.britannica.com/technology/electric-generator> a 19/02/2021
- [43] IVANENKO, Fernando. “O que é um gerador de carro”. *Blog “Mãos ao Auto”*. 18 de setembro de 2017.
Retirado da página:
<https://www.maosaoauto.com.br/2017/09/o-que-e-um-gerador-de-carro/> a 26/02/2021
- [44] MARINHO, Pedro. “Desenvolvimento de uma Unidade de Controlo Eletrónico de baixo custo com base num microcontrolador de 32 bits”. Projeto de Mestrado em Engenharia Automóvel. Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (ESTG-IPL). Leiria. Setembro de 2015.

- [45] DIXON, Juan. “*Energy Storage for Electric Vehicles*”. *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 20 - 26. Abril de 2010.
- [46] DIRECT INDUSTRY. “*Lead-Acid Battery*”.
Retirado da página:
http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/lead-acid-battery-powermaintenance-free-emergency-power-supply-69492-3441921.jpg. a 08/02/2021
- [47] DIRECT INDUSTRY. “*Nickel-Cadmium Battery*”. 8 de fevereiro de 2019.
Retirado da página:
<https://www.directindustry.com/prod/sichuan-changhong-battery-co-ltd/product-71984-2318726.html> a 08/02/2021
- [48] DIRECT INDUSTRY. “*Ni-MH batteries*”. 21 de agosto de 2019.
Retirado da página:
<https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/ni-mh-battery-75734.html> a 08/02/2021
- [49] TENERGY. “*LiFePO₄ Rechargeable Battery*”. 30 de outubro de 2014.
Retirado da página:
<https://power.tenergy.com/at-i-tenergy-12-8v-40ah-lifepo4-battery-pack-with-pcb-short-pack-dgr/> a 08/02/2021
- [50] YOUNG, Kwo *et al.* “*Electric Vehicle Battery Technologies*”. *Electric vehicle integration into modern power networks*. Cap. 2, pp. 15 - 56. Springer. Nova Iorque, Estados Unidos da América. Janeiro de 2013.
- [51] LARMINIE, James; LOWRY, John. “*Electric Vehicle Technology Explained*”. 2^a Edição. Wiley. Reino Unido. 2012.
- [52] JAZAR, Reza N. “*Vehicle Dynamics: Theory and Application*”. Departamento de Engenharia Mecânica do Colégio de Manhattan. Springer. Nova Iorque. 2008.
- [53] SACEL. “Carros novos: Citroën C1”. Leiria. 8 de outubro de 2019.
Retirado da página:
<https://www.sacel.pt/carros-novos/citroen-c1> a 15/10/2021
- [54] GOODYEAR. “Como ler as marcas nos flancos dos pneus”.
Retirado da página:
https://www.goodyear.eu/pt_pt/consumer/learn/how-to-read-your-tire-sidewall-markings.html a 15/10/2021
- [55] AUTOMOBILE CATALOG. “*2020 Citroen C1 VTi 72 (man. 5) (Start, Live, Feel, Shine) (model for Europe) car specifications & performance data review*”. 15 de setembro de 2019.
Retirado da página:
https://www.automobile-catalog.com/car/2020/2969270/citroen_c1_vti_72.html a 18/10/2021
- [56] DUKE, Mike; ANDREWS, Deborah; ANDERSON, Timothy. “*The feasibility of long range Battery Electric cars in New Zealand*”. *Energy Policy*, vol. 37, pp. 3455 - 3462. Elsevier. Nova Zelândia. 20 de dezembro de 2008.
- [57] SU, Tony. “*10 kw 96V Front Wheels AC Driving System*”. Foshan Uni Technology

- Co., Ltd. Guangdong, China. 15 de abril de 2017.
Retirado da página:
https://www.alibaba.com/product-detail/10kW-96V-Front-Wheels-AC-Driving_1600210333636.html a 15 de maio de 2021.
- [58] YAN, Li. “*Permanent Magnet Generator*”. Qingdao Greef New Energy Equipment Co.,Ltd. Shandong, China. 28 de novembro de 2019.
Retirado da página:
<https://us-icbuim-file.oss-us-east-1.aliyuncs.com/file/907788d872dbf76e8dd64e265036461.pdf?Expires=1642012924&OSSAccessKeyId=LTAIxlzvmECyZvmX&Signature=zzaNXC1X6n9%2BwadqBzrOdXnoDS0%3D&response-content-disposition=file%3D10kw%20%20PMG%20%203000RPM%20--%20allrun.pdf> a 2 de junho de 2021
- [59] WANG, Emily. “Permanent Magnet Generator”. Qingdao Greef New Energy Equipment Co., Ltd. Qingdao, China. 10 de junho de 2021.
- [60] FLOWFIT. “*Genuine Honda 9.5 HP Single Cylinder 4 Stroke Air Cooled Petrol Engine, Recoil Start, Horizontal Mount (Red)*”. Ludlow, Inglaterra. 13 de julho de 2015.
Retirado da página:
<https://www.flowfitonline.com/petrol-and-diesel-engines/honda-petrol-engines/genuine-honda-95-hp-single-cylinder-4-stroke-air-cooled-petrol-engine-recoil-start-horizontal-mount-red> a 19/10/2021
- [61] IOTTA. “GX 270 Horizontal shaft gasoline (petrol) engine”. Gent, Bélgica.
- [62] TUTUIANU, Monica *et al.* “*Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation*”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 40, pp. 61 - 75. Elsevier. Outubro de 2015.
- [63] DIESELNET. “Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)”. 13 de novembro de 2013.
Retirado da página:
<https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php> a 20/10/2021
- [64] GIS, M.; BEDNARSKI, M. “Comparative studies of harmful exhaust emission from a hybrid vehicle and a vehicle powered by spark ignition engine”. International Automotive Conference (KONMOT2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 421, 4ª edição. Cracóvia, Polónia. Outubro de 2018.
- [65] PAFFUMI, Elena *et al.* “Alternative utility factor versus the SAE J2841 standard method for PHEV and BEV applications”. *Transport Policy Journal*. vol. 68, pp. 80 – 97. Elsevier. European Commission, Joint Research Centre. Varese, Itália. Fevereiro de 2020.
- [66] SAE International Hybrid-EV Committee. “*J2841: Utility Factor Definitions for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Travel Survey Data-SAE International*”. SAE International Hybrid-EV Committee, SAE International, Warrendale, Estados Unidos da América. 21 de setembro de 2010.

- [67] PLÖTZ, Patrick; JÖHRENS, Julius. “*Realistic Test Cycle Utility Factors for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Europe*”. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. Karlsruhe, Alemanha. Abril de 2021.
- [68] ŠARKAN, B. *et al.* “*Possibilities of measuring the Brake Specific Fuel Consumption in road vehicle operation*”. *International Scientific Journal ‘Machines. Technologies. Materials.’*, vol. 8, 5ª Edição, pp. 19 – 21. Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications – University of Žilina. Žilina, Eslováquia. 2014.
- [69] AVL. AVL Cruise User’s Guide 2020.
- [70] WAHONO, Bambang; *et al.* “*Analysis of range extender electric vehicle performance using vehicle simulator*”. *Energy Procedia*, vol. 65, pp. 409 - 418. Elsevier. Research Centre for Electrical Power & Mechatronics, Indonesian Institute of Sciences. Bandung, Indonésia. Abril de 2015.
- [71] TUTUIANU, Monica *et al.* “*Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) – Technical Report*”. UN/ECE/WP.29/GRPE/WLTP-IG. Janeiro de 2014.
- [72] ERSE. “Preços médios praticados em Portugal dezembro 2021”. Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). Retirado da página: https://www.erse.pt/media/fiznwps3/12-2021_boletim-combust%C3%ADveis.pdf a 10/01/2022
- [73] ERSE. “Tarifas e preços para a energia elétrica e outros serviços em 2021”. Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). Diretiva nº1/2021. Parte E - Entidades administrativas independentes e Administração autónoma. Diário da República: 2ª série, pp. 162 – 255. 8 de janeiro de 2021.
- [74] CAETANO, Edgar. “Inflação em Portugal foi de 1,3% em 2021, um ano em que os preços tiveram um "forte movimento ascendente", diz o INE”. *Jornal “Observador”*. Lisboa. 12 de janeiro de 2022. Retirado da página: <https://observador.pt/2022/01/12/inflacao-em-portugal-foi-de-13-em-2021-um-ano-em-que-os-precos-tiveram-um-forte-movimento-ascendente-diz-o-ine/> a 14/01/2022
- [75] VEZA, I *et al.* “Potential of range extender electric vehicles (REEVS)”. Sustainable and Integrated Engineering International Conference 2019 (SIE 2019). Automotive Development Centre, School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia. Johor Bahru, Malásia. 2019.
- [76] LAWRENCE, J. “*A Catalog of Special Plane Curves*”. Dover Publications. Nova Iorque, Estados Unidos da América. 1972.
- [77] CORREIA, Ricardo. “Motor Wankel: rotatividade em estado puro”. *Blog “Razão Automóvel”*. 21 de abril de 2014. Retirado da página: <https://www.razaoautomovel.com/2014/04/wankel-o-anti-pista/> a 23/04/2021
- [78] GUO, Chendong *et al.* “Advances in free-piston internal combustion engines: A comprehensive review”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 189. Elsevier. 6 de

fevereiro de 2021.

- [79] CAPEHART, Barney. "*Microturbines. Whole Building Design Guide (WBDG)*". Faculdade de Engenharia, Universidade da Flórida. Flórida, Estados Unidos da América. 22 de dezembro de 2016.
Retirado da página:
<https://www.wbdg.org/resources/microturbines> a 23/04/2021
- [80] VIJAYENTHIRAN, Viknesh. "*CMT-380 Hybrid Concept Comes Complete With Jet Turbine*". Blog "Motor Authority". 30 de novembro de 2009.
Retirado da página:
https://www.motorauthority.com/news/1039249_cmt-380-hybrid-concept-comes-complete-with-jet-turbine a 23/04/2021
- [81] WALTERS, Marius; KUHLMANN, Axel; OGRZEWALLA, Jürgen. "Fuel Cell Range Extender for Battery Electric Vehicles". 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), pp. 1-6. Aachen, Alemanha. 2015.
- [82] KIM, Donghyun et al. "Integrated Design of In-Wheel Motor System on Rear Wheels for Small Electric Vehicle". EVS 25 World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium. World Electric Vehicle Journal (WEVA), vol. 4, pp. 597 - 602. Shenzehn, China. Novembro de 2010.
- [83] NEIGER, Christian. "*How In-wheel Motors Work*". *How Stuff Works*. 11 de maio de 2009.
Retirado da página:
<https://auto.howstuffworks.com/in-wheel-motor.htm> a 04/02/2021
- [84] OOST NL. "*English Protean Electric introduces innovative in-wheel electric motor*". 30 de outubro de 2018.
Retirado da página:
<https://oostnl.nl/nl/nieuws/engelse-protean-electric-introduceert-innovatieve-wheel-electric-motor> a 27/04/2021.
- [85] CIRCUIT GLOBE. "*What is Synchronous Generators?*". 21 de novembro de 2017.
Retirado da página:
<https://circuitglobe.com/synchronous-generators.html> a 15/09/2021
- [86] WAT ELECTRICAL. "*What is Synchronous Generator : Construction, Working & Its Applications*". 22 de janeiro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.watelectrical.com/what-is-synchronous-generator-construction-working-its-applications/> a 15/09/2021
- [87] STROSKI, Pedro Ney. "*Asynchronous x synchronous generators*". Electrical Library. 2 de novembro de 2019.
Retirado da página:
<https://www.electricalibrary.com/en/2019/11/02/asynchronous-x-synchronous-generators/> a 15/09/2021
- [88] HENRY. "*Introduction to Synchronous Generator, Working, Construction, Types & Applications*". Blog "The Engineering Knowledge". Lahore, Paquistão. 6 de

- outubro de 2019.
Retirado da página:
<https://www.theengineeringknowledge.com/introduction-to-synchronous-generator/> a 15/09/2021
- [89] ALXION. *“What is a Permanent Magnet Generator?”*. Colombes, França. 2011.
Retirado da página:
<http://www.alxion.com/glossary/permanent-magnet-generator/> a 16/09/2021
- [90] HENRY. *“Permanent Magnet Synchronous Generator”*. Blog “The Engineering Knowledge”. Lahore, Paquistão. 5 de dezembro de 2019.
Retirado da página:
<https://www.theengineeringknowledge.com/permanent-magnet-synchronous-generator/> a 16/09/2021
- [91] STARLIGHT POWER. *“What is Permanent Magnet DC Generator?”*. Jiangsu, China. 11 de abril de 2020.
Retirado da página:
<https://www.dieselgeneratortech.com/generators/what-is-permanent-magnet-dc-generator.html> a 16/09/2021
- [92] AGARWAL, Torun. *“What is a DC Generator : Construction and Its Working”*. EIProCus. Hyderabad, Índia. 2018.
Retirado da página:
<https://www.elprocus.com/what-is-a-dc-generator-construction-working-principle-and-applications/> a 17/09/2021
- [93] MAX. *“What is the Working Principle of DC Generator?”*. Linquip. Califórnia, Estados Unidos da América. 27 de setembro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.linquip.com/blog/working-principle-of-dc-generator/> a 17/09/2021
- [94] DPG POLYTECHNIC. *“DC Generator”*. Gurugram, Índia. 16 de junho de 2018.
Retirado da página:
<https://www.dpgpolytechnic.com/downloads/files/n5acb0e6dcb40b.pdf> a 17/09/2021
- [95] MAX. *“Parts of DC Generator: Explanation of Parts, Working, Types, Advantages & Disadvantages”*. Linquip. Califórnia, Estados Unidos da América. 7 de junho de 2020.
Retirado da página:
<https://www.linquip.com/blog/parts-of-dc-generator-explanation-working/> a 17/09/2021
- [96] MAX. *“What is an Induction Generator? An Ultimate Guide”*. Linquip. Califórnia, Estados Unidos da América. 4 de março de 2021.
Retirado da página:
<https://www.linquip.com/blog/what-is-an-induction-generator/> a 17/09/2021
- [97] CIRCUIT GLOBE. *“What is an Induction Generator”*. 10 de fevereiro de 2016.
Retirado da página:
<https://circuitglobe.com/induction-generator.html> a 17/09/2021
- [98] RAO, Gaurav. *“Induction Generator”*. The Leviathan. 11 de julho de 2021.

- Retirado da página:
<https://theleviathan.in/induction-generator/> a 17/09/2021
- [99] CIRCUIT GLOBE. “*Advantages and Applications of an Induction Generator*”. 9 de fevereiro de 2016.
Retirado da página:
<https://circuitglobe.com/advantages-and-application-of-an-induction-generator.html> a 17/09/2021
- [100] BRAINKART. “*Induction Generator advantages, disadvantages and Application*”. 20 de abril de 2017.
Retirado da página:
https://www.brainkart.com/article/Induction-Generator-advantages,-disadvantages-and-Application_12254/ a 17/09/2021
- [101] SPEZIA, Carl J. “Ac Motors, Generators and Power Systems”. Electrical Engineering Technology Online ET 332b Ac Electric Machines and Power Systems Course Introduction and Orientation. Department of Technology. Southern Illinois University. Illinois, Estados Unidos da América. 26 de janeiro de 2016.
- [102] SAMPURNO, B.; ABDURRAKHMAN, A.; HADI, H. “Development of Electrical Kinetic Energy Recovery System (KERS) on Motorcycle”. International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation 2015 (ICAMIMIA 2015), pp. 131 - 136. Surabaya, Indonésia. Outubro de 2015.
- [103] MLADENOV, Alexey. “Xtrac sees a number of applications for flywheel hybrids in road cars”. Blog “Automobiles Review”. 11 de junho de 2008.
Retirado da página:
<https://www.automobilesreview.com/auto-news/xtrac-sees-a-number-of-applications-for-flywheel-hybrids-in-road-cars/2154/> a 09/02/2021
- [104] COLLINS, Sam. “*Flywheel hybrid systems (KERS)*”. 21 de fevereiro de 2008.
Retirado da página:
<https://www.racecar-engineering.com/articles/f1/flywheel-hybrid-systems-kers/> a 09/02/2021
- [105] LINDZUS, Eric. “HRB – Hydrostatic Regenerative Braking System: The Hydraulic Hybrid Drive from Bosch Rexroth”. Bosch Rexroth, AG. 2010.
- [106] HE, Xiangyu. “The applications of energy regeneration and conversion technologies based on hydraulic transmission systems: A review”. Energy Conversion and Management, vol. 205. Changsha University of Science and Technology. Changsha, China. 2020.
- [107] DIAS, Tarcisio. “Gasolina e eletricidade: S 400 *Hybrid* é primeiro híbrido no Brasil”. Revista “Mecânica Online”. Edição 127. 2010.
- [108] PEREIRA, José; PERES, Pedro. “Comparação entre os sistemas híbridos da Toyota, Lexus e Honda”. Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Instituto Superior de Engenharia do Porto do Instituto Politécnico do Porto (ISEP-IPP). Porto. 30 de setembro de 2008.
- [109] MAGNUM CAP. “*MCR63 Charger - Electric Vehicle Charging for service stations, parks and workshops fleets of electric Vehicles*”. 6 de abril de 2016.

- Retirado da página:
https://twitter.com/magnum_cap/status/717730653895319552 a 16/02/2021
- [110]EFACEC. Quem Somos.
Retirado da página:
<https://www.efacec.pt/quem-somos/> a 16/02/2021
- [111]EFACEC. “Efacec lança carregador rápido de 2.^a geração para veículos elétricos”.
20 de maio de 2019.
Retirado da página:
<https://www.efacec.pt/efacec-lanca-carregador-rapido-de-2-a-geracao-para-veiculos-eletricos/> a 16/02/2021
- [112]ABB. História.
Retirado da página:
<https://new.abb.com/pt/sobre-nos/quem-somos/historia> a 16/02/2021
- [113]ABB. “EV Charging Infrastructure - ABB global charging portfolio”. Rijswijk, Holanda. 20 de dezembro de 2016.
- [114]DAVENPORT, David. “*Siemens & BMW: Wireless Electric Vehicle charging*”. Blog “Thinkd2c”. 15 de abril de 2011.
Retirado da página:
<https://thinkd2c.wordpress.com/2011/04/15/siemens-bmw-wireless-electric-vehicle-charging/> a 16/02/2021
- [115]SEBASTIÃO, Cláudio. “Projeção e desenvolvimento de carregadores para veículos elétricos - Relatório de Estágio na *Magnum Cap – Electrical Power Solutions*”. Relatório de Estágio para a obtenção do grau de Mestre em Mestrado em Engenharia Eletrotécnica. Escola Superior de Tecnologias de Tomar do Instituto Politécnico de Tomar (ESTT - IPT). Tomar. Setembro de 2014.
- [116]LINKBASIC. “*Vertical Rack 19" power strip equipped with a IEC60309-type plug and 24 E-type slots*”. Polónia. 13 de abril de 2016.
Retirado da página:
<https://www.linkbasic.eu/en/vertical-rack-19-power-strip-equipped-iec60309-type-plug-and-24-e-type-slots-cfu24-f-v15u-20-h1> a 17/02/2021
- [117]GATON, Bryce. “*Plug wars: Which plug will your EV use?*”. *Renew Magazine*. Melbourne, Austrália. 25 de outubro de 2017.
Retirado da página:
<https://renew.org.au/renew-magazine/electric-vehicles/plug-wars-which-plug-will-your-ev-use/> a 17/02/2021
- [118]BOWER, George. “*What is Level 3 Charging?*”. 25 de novembro de 2015.
Retirado da página:
<https://www.hybridcars.com/what-is-level-3-charging/> a 17/02/2021
- [119]KRIVEVSKI, Blagojce. “*Global Automakers to Demo EV Fast Charging at EVS26*”. *Electric Car News*. 3 de maio de 2012.
Retirado da página:
<https://electriccarsreport.com/2012/05/global-automakers-to-demo-ev-fast-charging-at-evs26/> a 17/02/2021
- [120]ELECTWAY STORE. “*GB/T DC charging Connector*”. Guangzhou, China. 27 de

- outubro de 2016.
Retirado da página:
http://www.electway-store.com/index.php?main_page=product_info&cPath=91&products_id=324 a 17/02/2021
- [121] CPFL ENERGIA. CHAdEMO – Recarga rápida CC. São Paulo, Brasil. 2019.
Retirado da página:
<https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/tipos-de-plug/Paginas/Chademo-yazaki.aspx> a 17/02/2021
- [122] E-COMPARADOR. “Clase de conectores que se utilizan en un punto de carga de un coche eléctrico”. 10 de setembro de 2020.
Retirado da página:
<https://www.e-comparador.com/clase-de-conectores-para-coches-electricos/> a 17/02/2021
- [123] HONDA. “Owner’s Manual GX 270 – GX 390 LPG – Fueled Engine”. 27 de setembro de 2016.
Retirado da página:
<https://www.manualslib.com/manual/69056/Honda-Gx270.html> a 08/10/2021
- [124] SEIXAS, Júlia. “Seminário em Energia e Alterações Climáticas”. Doutorado em Alterações Climáticas e Políticas de Desenvolvimento Sustentável. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente (DCEA). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL). Lisboa. 7 de maio de 2016.
- [125] CHUN, Chang Yoon et al. “State-of-Charge Estimation for Lithium-ion Battery Pack Using Reconstructed Open-Circuit-Voltage Curve”. *The 2014 International Power Electronics Conference (IPEC)*, pp. 2272 – 2276. Department of Electrical and Computer Engineering Seoul National University. Hiroshima, Japão. 7 de agosto de 2014.
- [126] ELMAHDI, Fadlaoui et al. “Fitting the OCV-SOC relationship of a battery lithium-ion using genetic algorithm method”. *E3S Web of Conferences. The International Conference on Innovation, Modern Applied Science & Environmental Studies (ICIES2020)*, vol. 234. Laboratory of Electronic Systems, Information Processing, Mechanics and Energy, Ibn Tofail University, Kenitra, Marrocos; Laboratory of Advanced Systems Engineering, National Schools of Applied Sciences, Ibn Tofail University, Kenitra, Marrocos. 2 de fevereiro de 2021.
- [127] POOLE, Ian. “Li-ion Lithium Ion Battery Charging”. Electronics Notes. Surrey, Inglaterra. 14 de junho de 2020.
Retirado da página:
https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-charging.php a 28/10/2021
- [128] WANG, Zhengwu et al. “Multi-Objective Optimization for Plug-In 4WD Hybrid Electric Vehicle Powertrain”. “Applied Sciences” Journal, vol. 9, n° 19. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, China; Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive & Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, China; National Demonstrating

Center for Experimental Civil Engineering Education, Hunan City University, Yiyang, China. 29 de setembro de 2019.

- [129]REINHART, Thomas et al. “Heavy-Duty Vehicle Fuel Saving Technology Analysis to Support Phase 2 Regulations”. SAE 2015 Commercial Vehicle Engineering Congress. SAE International Journal of Commercial Vehicles, vol. 8, n° 2, pp. 419 – 432. Southwest Research Institute, Texas, Estados Unidos da América; DOT/Volpe Center, Massachusetts, Estados Unidos da América; National Highway Traffic Safety Admin (NHTSA), Washington DC, Estados Unidos da América. Rosemont Illinois, Estados Unidos da América. 29 de setembro de 2015.
- [130]ENANG, Wisdom et al. “Modelling and Heuristic control of a Parallel Hybrid Electric Vehicle”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. Journal of Automobile Engineering, vol. 229. Universidade de Bath. Bath, Inglaterra. Janeiro de 2015.
- [131]MASCARENHAS, Manuel. “Sabes ler o código e a etiqueta dos pneus?”. *Blog “Razão Automóvel”*. Lisboa. 31 de maio de 2016.
Retirado da página:
<https://www.razaoautomovel.com/2016/05/pneus-sabe-como-ler-codigo-etiqueta-pneu> a 15/10/2021
- [132]REIMPELL, Jörnsten *et al.* “*The Automotive Chassis: Engineering Principles*”. *Society of Automotive Engineers, Inc.* (SAE). 2ª Edição. Elsevier. Pensilvânia, Estados Unidos da América. 2001.
- [133]KOSTOPOULOS, Emmanouil *et al.* “*Real-world study for the optimal charging of electric vehicles*”. *Energy Reports*, vol. 6, pp. 418 – 426. Elsevier. Mechanical Engineering Department, University of West Attica. Atenas, Grécia; Laboratory of Climatology and Atmospheric Environment, Faculty of Geology and Geoenvironment, National and Kapodistrian University of Athens. Atenas, Grécia. 18 de fevereiro de 2020.
- [134]FERNÁNDEZ, I.J. *et al.* “*Capacity fade and aging models for electric batteries and optimal charging strategy for electric vehicles*”. *Energy*, vol.60, pp. 35 – 43. Elsevier. Institute for Research in Technology (IIT), ICAI School of Engineering, Comillas Pontifical University. Madrid, Espanha. 7 de setembro de 2013.
- [135]LI, J. *et al.* “*Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge–discharge cycling*”. *Journal of Power Sources*, vol. 102, pp. 294 – 301. Elsevier. School of Chemical Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta, Estados Unidos da América. 15 de maio de 2001.
- [136]WU, Chao et al. “Research on overcharge and overdischarge effect on lithium-ion batteries”. 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1 – 6. Quebec, Canadá. Outubro de 2015.
- [137]MOTORES24H. “Citröen C1 1.0 VTi Feel”. Lisboa. 29 de maio de 2021.
Retirado da página:
<https://www.motores24h.pt/citroen-c1-1.0-vti-feel-carro-60b078d61126f40c6b20f75b/> a 12/01/2022
- [138]PROXIRA. “Gerador a Gasolina EUROPOWER EP 4100 (motor HONDA GX270)”.
Retirado da página:

<https://proxira.pt/geradores/4636-gerador-a-gasolina-europower-ep-2500-motor-honda-gx160.html> a 13/01/2022

ANEXO A – CONFIGURAÇÕES DOS VEÍCULOS HÍBRIDOS

A1. Híbrido Série (elétrico com extensor de autonomia)

Os veículos com configuração híbrido série consistem num veículo elétrico com um carregador de baterias a bordo. O motor de combustão interna trabalha no seu ponto de funcionamento ótimo, com a responsabilidade de fazer mover um gerador elétrico, que por sua vez produz energia elétrica. Esta energia pode ser utilizada de duas formas: para carregamento das baterias ou para acionamento do motor elétrico. De forma a manter o nível de energia das baterias num valor pré-determinado (65 a 75% da capacidade total), o MCI entra em funcionamento sempre que necessário. Como mostra a **Figura 62**, a propulsão do veículo será assegurada pelo motor elétrico, não existindo qualquer ligação mecânica entre o motor de combustão interna e as rodas motrizes.

Nas desacelerações ou travagens, o motor elétrico pode funcionar como gerador de energia elétrica, com esta energia (sob forma de corrente elétrica) a ser posteriormente usada para carregar as baterias [12].

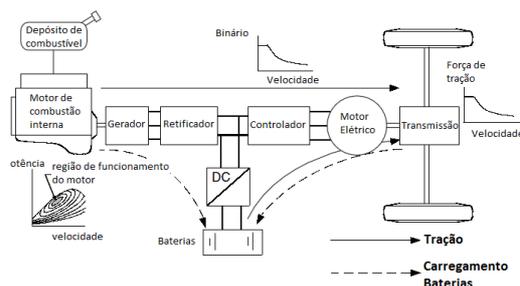


Figura 62 – Configuração de um híbrido série (elétrico com extensão de autonomia) [12].

A configuração híbrido série consiste nos seguintes modos de funcionamento [12]:

1. Motor de combustão interna desligado, atuando apenas o motor elétrico como propulsor do veículo, com a alimentação a ser efetuada pelas baterias;
2. Motor elétrico recebe energia proveniente do conjunto motor de combustão interna/gerador elétrico, com este conjunto a ser responsável pela propulsão do veículo;
3. Combinação dos dois últimos modos (motor elétrico alimentado pelo conjunto motor de combustão interna/gerador elétrico e pelas baterias);
4. Conjunto motor combustão interna/gerador alimenta quer as baterias quer o motor elétrico;
5. Conjunto motor de combustão/gerador apenas alimenta as baterias, com o motor elétrico

desligado (sem propulsão);

6. Travagem regenerativa, com o conjunto motor de combustão/gerador e motor elétrico a funcionarem como geradores, carregando as baterias.

A configuração híbrida série apresenta as seguintes vantagens [12]:

- Funcionamento num regime ótimo, quando o motor de combustão interna está desacoplado das rodas motrizes, alcançando uma melhor eficiência, economia de combustível, redução de ruído e emissões poluentes;
- Simplificação do controlo de velocidade do veículo;
- Simplificação de construção e de redução de custos, pela relação binário/velocidade de rotação do motor elétrico estar muito próxima do ideal.

Há, no entanto, alguns inconvenientes inerentes a esta arquitetura, tais como [12]:

- Existência de duas conversões de energia (energia mecânica do motor de combustão para energia elétrica através do gerador, e de novo para energia mecânica através do motor elétrico);
- Necessidade de possuir um gerador e um motor elétrico;
- Motor elétrico de grandes dimensões de modo a cumprir os requisitos do sistema;
- Baixo rendimento da conversão de energia.

A2. Híbrido Paralelo

Na configuração híbrido paralelo, tanto o motor de combustão interna como o motor elétrico estão conectados em paralelo à transmissão. Desta forma, a propulsão do veículo pode ser assegurada quer pelo motor de combustão interna quer pelo motor elétrico, ou pelos dois em simultâneo, de modo a alimentar o veículo com o binário requerido.

No caso da potência requerida ser inferior à potência que o motor de combustão interna tem à sua saída, a energia restante é utilizada no carregamento das baterias. O conceito de “travagem regenerativa” é possível ser aplicado neste tipo de configuração, no qual o motor elétrico é usado como gerador, permitindo assim o carregamento das baterias [12].

Este tipo de configuração tem potencialmente os seguintes modos de funcionamento [12]:

1. Motor de combustão interna desligado, com a propulsão do veículo a ser assegurada pelo motor elétrico;
2. Motor de combustão interna responsável pela propulsão do veículo, e o motor elétrico desligado;
3. Motor de combustão interna e motor elétrico fornecem o binário propulsor ao veículo;
4. Motor elétrico responsável pela propulsão do veículo e pelo carregamento das baterias;
5. Modo de carregamento estacionário, com o veículo parado, em que apenas são carregadas as baterias;
6. Travagem regenerativa, com o motor de combustão interna desligado ou desacoplado. O motor elétrico funciona como gerador, sendo que a energia cinética ou potencial do veículo é convertida em energia elétrica e usada para carregar as baterias.

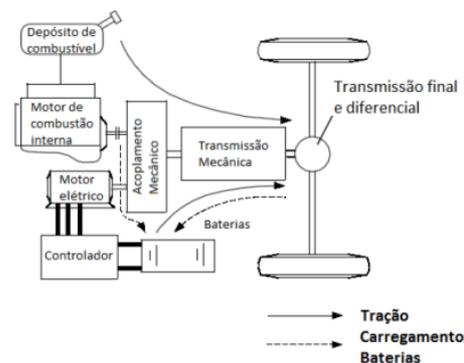


Figura 63 – Configuração de um híbrido paralelo [12].

A configuração híbrida paralela apresenta uma série de vantagens, das quais se destacam [12]:

- Motor de combustão interna e motor elétrico fornecem diretamente binário às rodas motrizes, com a diminuição das perdas de energia;
- Menor atravancamento (inexistência de gerador elétrico e menor dimensão do motor elétrico).

Há, no entanto, alguns inconvenientes inerentes a esta arquitetura, tais como [11]:

- Acoplamento mecânico entre o motor de combustão interna e as rodas motrizes impede o funcionamento ótimo do motor de combustão interna, daí serem precisas embraiagens;

- Maior complexidade da estrutura e do controle;
- Configuração com custos mais elevados;
- Necessidade de alta voltagem para ser mais eficiente.

A3. Híbrido Série-Paralelo

A configuração híbrido série-paralelo consiste em incorporar as características das configurações anteriormente abordadas.

A configuração série-paralelo apresenta uma ligação mecânica adicional entre o motor elétrico e o gerador quando comparada com a configuração em série. No confronto entre a configuração série-paralelo e a configuração em paralelo, apresenta um gerador adicional.

A junção das duas configurações (série e paralelo), ao serem adicionadas a um mecanismo divisor de potência permite a transferência de potência do motor de combustão para as rodas motrizes. O mecanismo divisor de potência consiste num conjunto de engrenagens planetárias, que permitem a ligação entre o motor elétrico e o gerador com o motor de combustão interna, do modo que é ilustrado na **Figura 64** [12].

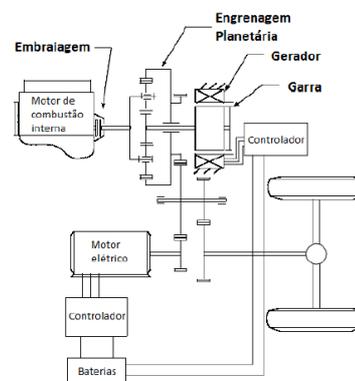


Figura 64 – Configuração de um híbrido série-paralelo [12].

A4. Comparação entre as diferentes configurações

Na **Tabela 36** apresenta-se uma comparação das três configurações anteriormente abordadas com um veículo convencional (propulsão a partir do MCI):

Tabela 36 – Comparação entre as diferentes configurações com um veículo convencional [12].

Configurações vs. Características	Série (elétrico com extensor de autonomia)	Paralelo	Série - Paralelo
Eficiência circuito urbano	++	+	++
Eficiência circuito extraurbano	+	++	++
Potencial de redução de emissões	++	+	++
Custo	--	-	--
Complexidade	-	-	--
Facilidade de Controlo	-	-	--

++ muito melhor do que um veículo convencional similar

+ melhor do que um veículo convencional similar

- pior do que um veículo convencional similar

-- muito pior do que um veículo convencional similar

ANEXO B – MOTORES UTILIZADOS NOS RANGE EXTENDER

Neste anexo serão abordados alguns elementos que constituem os *range extenders*, nomeadamente os motores de combustão convencionais com pistões, os motores do tipo rotativo (Wankel), os motores de pistão-livre, as microturbinas e as células de combustível.

B1. Motor de combustão interna convencional

O princípio de funcionamento de um motor convencional (combustão interna) baseia-se na ligação entre o motor e o gerador, como mostra a **Figura 65**. No caso da energia fornecida pela bateria ser suficiente, então o motor não entrará em funcionamento. Caso contrário, o motor será acionado para gerar energia mecânica, com a conversão desta em energia elétrica, podendo ser armazenada ou usada pelo motor elétrico para mover o veículo.

O motor mais comum é o motor a gasolina, também designado por motor de ignição comandada, ou de ignição por faísca, dado a combustão se iniciar a partir da aplicação de uma descarga elétrica de elevada tensão na câmara de combustão, por intermédio de uma vela [16].

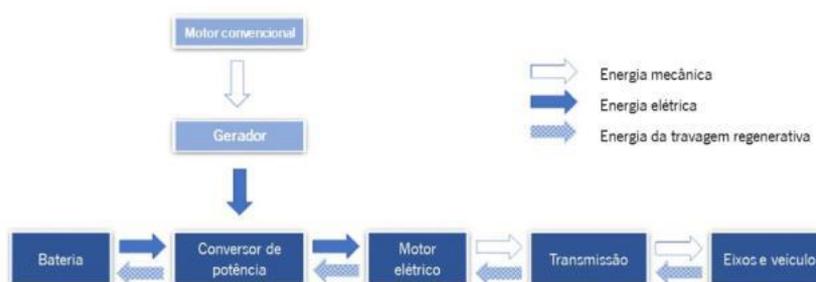


Figura 65 – Princípio de funcionamento dos extensores de autonomia com motor de combustão interna (adaptado de [75]).

Este motor apresenta quatro estágios diferentes durante o seu ciclo (**Figura 66**), a que correspondem duas rotações completas da cambota. Estas fases são:

- **Admissão:** o pistão encontra-se em fase descendente e a válvula de admissão aberta. Ocorre uma depressão no interior do cilindro, que induz a entrada de ar e gasolina proveniente do sistema de alimentação na câmara de combustão.
- **Compressão:** ambas as válvulas estão fechadas, havendo o movimento ascendente do pistão que comprime os gases, o que eleva a temperatura e a turbulência da mistura. Com isto, a mistura ar-combustível é homogeneizada, ocorrendo a vaporização de alguma gasolina que ainda se encontre no estado líquido.

- Expansão: ao atingir o PMS (Ponto Morto Superior) dá-se o lançamento de uma faísca elétrica entre os elétrodos da vela, na câmara de combustão. Como existem altas pressões e temperaturas, a mistura queima rapidamente, o que faz o pistão descer até ao PMI (Ponto Morto Inferior). Nesta fase do ciclo é onde é produzido trabalho.
- Escape: é aberta a válvula de escape, com a evasão dos gases resultantes da explosão. O movimento ascendente feito pelo pistão tem o objetivo de limpar o interior do cilindro dos gases queimados, sendo estes libertados para a atmosfera.

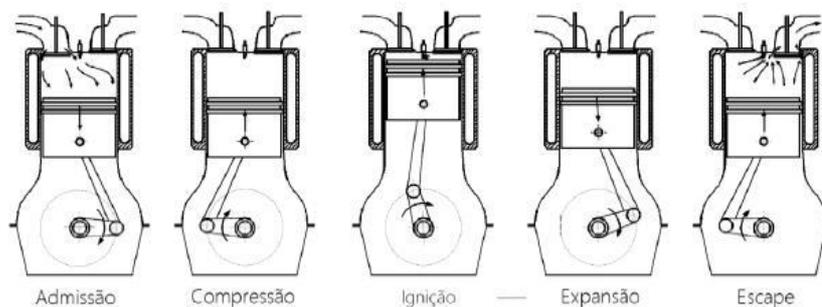


Figura 66 – Representação dos 4 tempos do motor de ignição comandada (adaptado de [16]).

B2. Motor rotativo Wankel

O motor Wankel consiste num rotor que roda dentro de um estator em forma de epitrocóide, isto é, uma roleta descrita por um ponto associado a um círculo de raio r que rola externamente ao redor de outro círculo fixo de raio R [76].

O rotor é composto por 3 lóbulos, com cada um a conter uma câmara de combustão. Tal como nos motores de combustão convencionais existem igualmente quatro fases que formam cada ciclo. A zona apresentada do lado esquerdo denomina-se de zona de lavagem, enquanto a zona da direita é a zona de combustão (representada pelas 2 velas).

O rotor gira sobre uma roda dentada fixa no estator, enquanto o veio de saída é excêntrico para que o movimento do rotor lhe seja transmitido. Na **Figura 67** é possível ver o modo de funcionamento deste tipo de motor. Na zona de admissão há o aumento do volume entre o rotor e a carcaça, com a abertura da janela de admissão. Com o fecho desta através do rotor, o que provoca a diminuição do volume, ocorre a fase de compressão. Quando é atingido o mínimo de estado livre (PMS nos motores convencionais), as velas libertam a faísca, a que se segue a fase de expansão. Com o fim da expansão é aberta a janela de escape, por onde são libertados os gases queimados. Nos restantes 2 lóbulos são feitas também as fases descritas anteriormente com desfasamento entre elas [17].

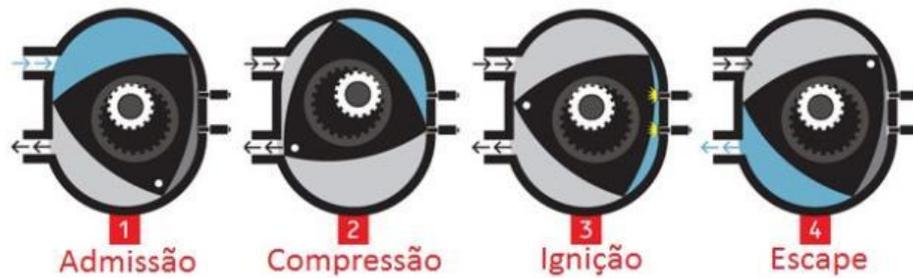


Figura 67 – Motor Wankel [77].

O motor Wankel apresenta como vantagens a suavidade e isenção de vibrações, além do dobro da potência dos motores convencionais de igual cilindrada e elevada velocidade máxima de funcionamento.

Contudo, este tipo de motores apresenta diversos inconvenientes, dos quais se podem destacar [16]:

- Dificil vedação da câmara de combustão;
- Perdas de atrito elevadas;
- Possibilidade de “curto-circuito” da mistura para o escape;
- Falta de compacidade da câmara de combustão (uso de 2 ou 3 velas), o que reduz o rendimento;
- Elevados gradientes térmicos entre diferentes zonas do motor;
- Reparações complexas e dispendiosas.

B3. Motores de pistão-livre

O conceito de motores de pistão-livre presente na **Figura 68** consiste num motor de combustão interna, com a diferença do pistão e a biela terem um movimento linear, ou seja, não há restrição por parte da cambota.

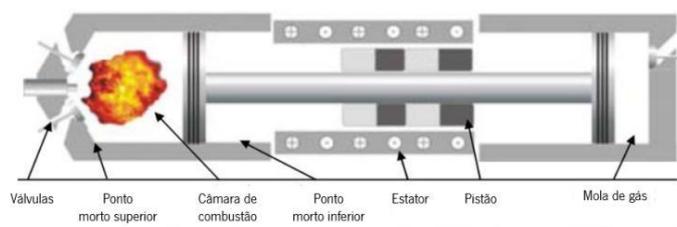


Figura 68 – Princípio de funcionamento dos motores de pistão-livre [78].

Inicialmente, estes motores foram desenvolvidos pela combinação da combustão a 2 tempos com

um gerador linear e uma mola de gás com dois pistões com movimentos opostos, com as válvulas a serem controladas de forma eletromagnética. O movimento do pistão-livre permitia uma variação do curso e da taxa de compressão, com a possibilidade de otimização para diferentes necessidades de desempenho, o que torna este motor mais eficiente em comparação com os motores convencionais.

Com o desenvolvimento das tecnologias de manufatura, estratégias de controlo e desempenho dos motores de combustão interna foi renovado o interesse neste tipo de motores, em especial nos motores de pistão-livre com gerador linear e hidráulicos.

Os motores de pistão-livre com gerador linear baseiam-se nas altas pressões e temperaturas que são originadas pela combustão no cilindro que conduz o sistema biela-manivela. Posteriormente, o gerador linear converte a energia cinética da biela-manivela em energia elétrica.

Os motores de pistão-livre hidráulicos combinam o motor de pistão-livre com um sistema hidráulico, e tal como o tipo de motor abordado no parágrafo anterior, são geradas altas pressões e temperaturas pela combustão no cilindro que conduz o sistema biela-manivela, ocorrendo a compressão do fluido hidráulico. De seguida, a energia química do combustível é convertida em energia hidráulica a altas pressões [76].

B4. Microturbina

As microturbinas, ao contrário dos motores apresentados anteriormente, são classificadas como dinâmicas em vez de volumétricas. A nível de potência, podem ir dos 30 kW aos 500 kW. Consistem num tipo de turbina de combustão, que pode produzir calor ou eletricidade em pequena escala. Os elementos que constituem a turbina são o compressor, o recuperador e o gerador elétrico [79].

As microturbinas podem ser divididas em veio único e veio duplo, residindo a diferença no facto de no primeiro caso o compressor e a turbina se encontrarem montados em série com o gerador elétrico (ver **Figura 69**). Neste tipo de turbinas, as velocidades de rotação variam entre as 50 000 rpm e as 120 000 rpm.

Nas microturbinas de veio duplo, o primeiro veio funciona como conetor entre o compressor e a turbina que permite a rotação desta, ao passo que o segundo veio recorre a uma caixa de velocidades de forma a fazer a ligação da turbina de potência ao gerador.

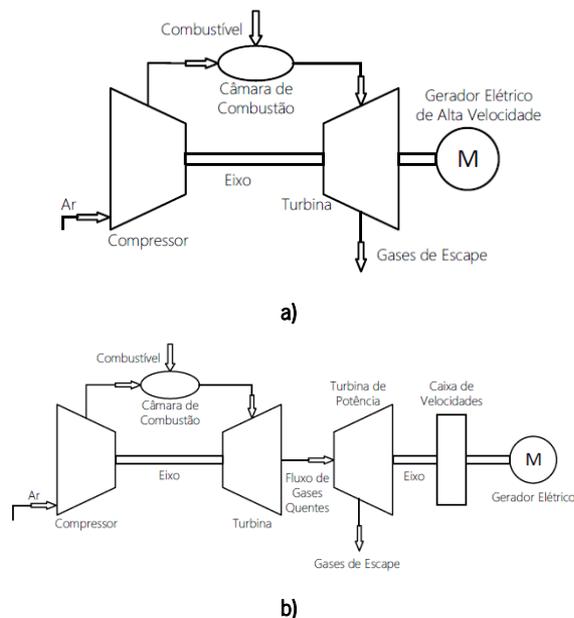


Figura 69 – a) Esquema de microturbina de veio único; b) Esquema de microturbina de veio duplo [16].

Nas microturbinas, usualmente é usado o gás natural como combustível. Outros fatores que permitem encarar esta opção como vantajosa são as baixas emissões de gases poluentes, baixos custos de manutenção, tamanho compacto e ausência de ruídos [16].

Em 2009, a Capstone apresentou no salão de Los Angeles um carro desenvolvido pela Capstone Turbine Corporation (**Figura 70**), que consistia num carro híbrido de alto desempenho. O Capstone Turbine CMT-380 era composto por uma microturbina de 40 cv de potência com motor Diesel ou biodiesel. A nível de prestações anunciava uma aceleração dos 0-100 km/h em cerca de 4 s, velocidade máxima de 240 km/h e capacidade para percorrer 800 km com um único depósito, a que se juntavam reduzidas emissões de gases poluentes, o que lhe permitia rivalizar com os híbridos presentes no mercado há época.

A nível mecânico o carro consistia num gerador elétrico e na turbina montados num veio único suportados por rolamentos a ar, o que evitava a necessidade de líquidos para lubrificação ou arrefecimento da turbina.

Era possível realizar uma condução 100% elétrica durante aproximadamente 130 km. Ao ser atingido um pré-determinado estado de descarga, a microturbina entrava em funcionamento para recarregar as baterias e assim permitir a autonomia anunciada de 800 km [80].



Figura 70 – Capstone CMT-380 [80].

B5. Células de combustível

O uso de células de combustível em extensores de autonomia permite abastecer um veículo tradicional em poucos minutos, apenas com a emissão de água. Este sistema tem uma redução de custos em comparação aos sistemas de propulsão a células de combustível, dado que os custos aumentam devido à potência elétrica, que é requerida em menor quantidade nos sistemas de propulsão principais.

No projeto BREEZE (Figura 71), foi desenvolvida uma bateria elétrica pela FEV incorporada num Fiat 500, que serviu de veículo de demonstração para um extensor de autonomia à base de células de combustível. O sistema tem por base a localização dos componentes elétricos na parte da frente, em que se instalaram já os componentes habituais. A bateria foi montada debaixo do chassis entre os eixos, ficando a localização do *range extender* limitada à parte debaixo dos bancos traseiros, depois do espaço destinado ao pneu sobresselente. O tanque de hidrogénio de alta pressão foi instalado igualmente por baixo dos bancos traseiros, fornecendo 34 l a 700 bar de pressão, o que adiciona uma autonomia de 180 km [81].

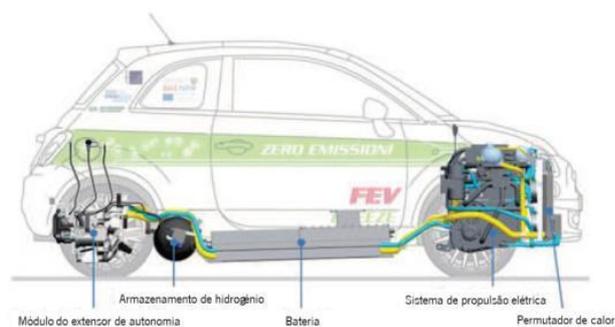


Figura 71 – Projeto BREEZE incorporado no Fiat 500 (adaptado de [81]).

ANEXO C – MOTORES DE RELUTÂNCIA COMUTADA (SRM)

C1. Motor de relutância comutada linear

Os motores de relutância comutada lineares (*Linear Switched Reluctance Motor*) são semelhantes aos SRM's convencionais na sua estrutura, à exceção do rotor e do estator que são abertos de forma linear (**Figura 72**). Este tipo de motores é aplicado em comboios elétricos e metropolitanos [36].

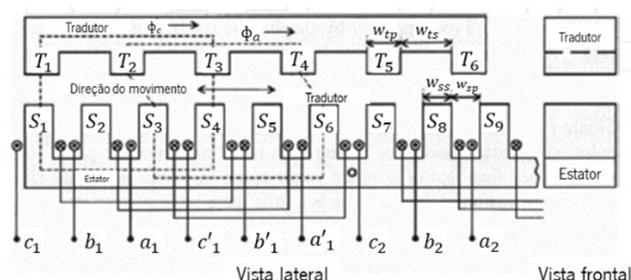


Figura 72 – Estrutura dos motores de relutância comutada lineares (LSRM) (adaptado de [36]).

C2. Motor de relutância comutada de fluxo axial

Nestes motores, a trajetória do fluxo está alinhada com o eixo do motor, sendo usados para casos onde o comprimento do motor é de grande importância, em que são usados motores pequenos e de binário elevado, para aplicações como ventiladores de ar condicionado e veículos elétricos [36].

C3. Motor de relutância comutada de fluxo radial

Os motores de relutância comutada de fluxo radial (**Figura 73**) são a estrutura mais comum entre as estruturas SRM, e estão divididas em duas categorias [36]:

- Motores de relutância comutada convencionais: nesta estrutura, os polos que estão frente a frente são ligados em série para formar uma fase;
- Motores de relutância comutada de curso curto: nesta estrutura, os polos adjacentes são ligados em série para formar uma fase.

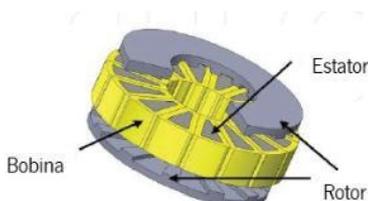


Figura 73 – Estrutura de um motor de relutância comutada de fluxo axial (adaptado de [36]).

ANEXO D – MOTOR NA RODA (*IN-WHEEL MOTOR*)

Um conceito que tem gerado um interesse renovado é o motor na roda (*in-wheel motor*). Este motor caracteriza-se por estar acoplado diretamente à roda (Erro! A origem da referência não foi encontrada.), dispensando assim outras ligações mecânicas como rodas dentadas ou *cardans*, permitindo um maior controlo de tração do veículo, dado que o binário em cada roda pode ser independente, o que favorece os sistemas de estabilidade do automóvel. Este tipo de motorização dá maior liberdade no desenho dos componentes mecânicos do automóvel e na sua interligação, pois desaparecem os sistemas de transmissão [2] [82].

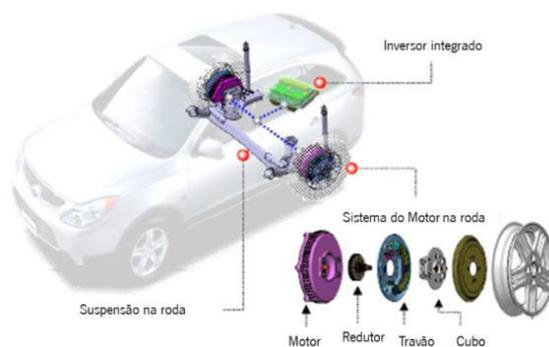


Figura 74 – Configuração do sistema do motor na roda (adaptado de [80]).

Com o motor na roda, um único modelo de motor pode ser usado em múltiplos modelos e para duas gamas de potência (se aplicado a duas ou quatro rodas). Contudo, este sistema de motor na roda tem o constrangimento do espaço disponível na roda, em especial no eixo dianteiro, devido à existência do travão, direção e estrutura da suspensão [2] [83].

Um aspeto importante a ter em consideração é o tipo de motor a incorporar no sistema, uma vez que, tal como referido no parágrafo anterior, há limitações definidas pelo eixo da direção e pelo raio do pneu. Entre todos os tipos de motores elétricos utilizados, o motor síncrono de ímãs permanentes é o que apresenta menores dimensões [82].

A quantidade de potência gerada por estes motores com rodas pode variar dependendo do fabricante e do tamanho do motor. No caso da empresa Protean Electric (**Figura 75**), esta apresentou o modelo do camião Ford F-150 na feira da *Specialty Equipment Market Association* (SEMA) em 2008. A modificação neste modelo consistiu em remover o motor V8 e adicionar quatro motores elétricos nas rodas. Cada um dos quatro motores Protean Drive era capaz de fornecer mais de 100 cv cada um, num total de 400 cv, o que era muito mais do que produzido pelo motor V8 padrão. Cada motor pesava apenas 31 kg e ganhava potência a partir de uma bateria de 42 kWh de íões de lítio que fornecia ao camião um alcance

de 161 km antes de recarregar.

Uma das maiores vantagens dos motores elétricos nas rodas é o facto de a potência passar diretamente do motor para a roda. A redução da distância percorrida pela potência aumenta a eficiência do motor. Em condições de condução urbana, um motor de combustão interna pode funcionar apenas com uma eficiência de 20%, o que significa que a maior parte da sua energia é perdida ou desperdiçada através dos métodos mecânicos utilizados para levar a potência até às rodas [81].



Figura 75 – Motor na roda desenvolvido pela Protean [82].

ANEXO E – TIPOS DE GERADORES EXISTENTES

E1. Geradores síncronos

O gerador síncrono ou alternador (**Figura 76**) é uma máquina elétrica que converte a energia mecânica de um motor principal em potência elétrica de corrente alternada a tensão e frequência específicas. O motor síncrono funciona sempre a velocidade constante, designada de velocidade síncrona [85].

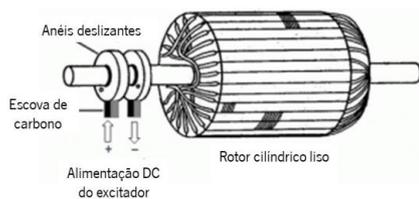


Figura 76 – Gerador síncrono (adaptado de [86]).

O gerador síncrono funciona segundo o princípio das leis de Faraday da indução eletromagnética. A indução eletromagnética afirma que a força eletromotriz é induzida na bobina da armadura se ela estiver a girar num campo magnético uniforme. A força eletromotriz também será gerada se o campo girar e o condutor ficar estacionário. Assim, o movimento relativo entre o condutor e o campo induz a f.e.m. no condutor. A forma da onda da tensão induzida é sempre uma curva sinusoidal.

O rotor e o estator são a parte rotativa e estacionária do gerador síncrono, constituindo os componentes de geração de energia do gerador síncrono. O rotor possui o polo de campo e o estator consiste no condutor da armadura. O movimento relativo entre o rotor e o estator induz a tensão entre o condutor [85] [86].

A construção de um gerador síncrono é apresentada na **Figura 77**. As partes principais incluem principalmente um estator e também um rotor. Mas, na maioria dos geradores, os excitadores de campo giram e a bobina da armadura fica imóvel [86].

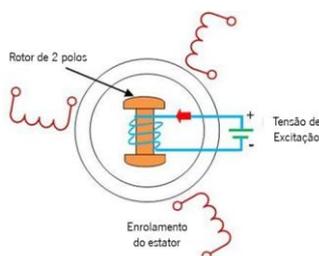


Figura 77 – Construção de um gerador síncrono (adaptado de [85]).

Ao contrário dos motores CC, o estator é utilizado para segurar o enrolamento da armadura. O núcleo do estator é projetado com um ferro magnético, caso contrário, a laminação de ligas de aço reduz as

perdas por correntes parasitas.

No gerador síncrono, existem dois tipos de rotores: tipo saliente e tipo cilíndrico. O rotor de polo saliente pode ser usado em alternadores com velocidade baixa e média. Este tipo de rotor encontra-se coberto para reduzir as perdas por correntes parasitas, possuindo diâmetros grandes e comprimentos de onda curtos.

Os rotores cilíndricos são usados principalmente em alternadores de alta velocidade, como turbo alternadores. Este rotor inclui um cilindro de aço plano e sólido com ranhuras e uma periferia externa, em que as referidas ranhuras consistem em enrolamentos de campo [86].

E1.1 Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [87]

- Maior eficiência comparativamente aos geradores de indução, quando fabricados em larga escala;
- Maior estabilidade de tensão e frequência devido ao sincronismo da velocidade do rotor e do campo magnético giratório.

❖ Desvantagens [87]

- Precisa de uma fonte de corrente contínua para alimentar o rotor;
- Alternadores com enrolamentos no rotor requerem mais manutenção, devido ao desgaste das escovas e anéis coletores.

E1.2 Aplicações [88]

- Turbinas eólicas;
- Turbinas a vapor;
- Hidroturbinas.

E2. Geradores síncronos de ímanes permanentes

Um gerador de ímanes permanentes é um dispositivo que converte energia mecânica em energia elétrica. Neste dispositivo (**Figura 78**), os enrolamentos do rotor são substituídos por ímanes

permanentes, em comparação com os tradicionais geradores síncronos. Esses dispositivos não requerem alimentação CC separada para o circuito de excitação ou possuem anéis coletores e escovas de contacto. Este tipo de gerador revela-se uma alternativa aos motores de indução tradicionais que podem ser acoplados a turbinas, geradores a Diesel e usados para veículos híbridos. Outra grande vantagem é não requererem nenhum ambiente de trabalho específico e, portanto, podem ser utilizadas em turbinas eólicas e hidráulicas [89].

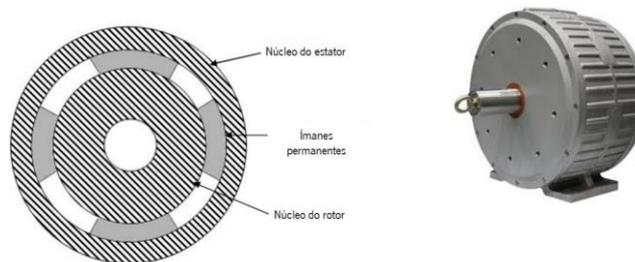


Figura 78 – Gerador síncrono de ímãs permanentes (adaptado de [90]).

O princípio de funcionamento encontra-se ilustrado na **Figura 79**, e é o mesmo de um gerador de corrente alternada, usando o princípio de indução eletromagnética do potencial elétrico induzido pelo corte da linha de força magnética para transferir a energia mecânica do motor principal em energia elétrica e, em seguida, produzir energia elétrica, sendo composto pelo estator e pelo rotor. O estator é a armadura que gera eletricidade e o rotor é o polo. O estator é composto por núcleo de armadura, enrolamento trifásico com descarga uniforme, base e tampa de extremidade. O rotor é geralmente do tipo polo oculto, que consiste num enrolamento de excitação, núcleo e eixo de ferro, anel de retenção e anel central. O enrolamento de excitação do rotor é conectado com corrente contínua, que produz um campo magnético próximo à distribuição sinusoidal, denominado campo magnético do rotor. Quando o rotor gira, o campo magnético do rotor gira junto com cada rotação durante um ciclo. A linha de força magnética corta cada enrolamento de fase do estator em sequência e induz o potencial de corrente alternada trifásico no enrolamento do estator trifásico [91].

No estator do gerador, os enrolamentos são enrolados e fixados nos respectivos lugares, enquanto o rotor que possui um ímã permanente é conectado ao rolamento, o que faz com que gire no eixo do gerador.

Neste tipo de gerador existem 2 rotores, com o primeiro a localizar-se atrás do estator e o segundo no lado externo. Ambos estão conectados entre si por meio de pinos longos que se movem pelo orifício no estator. As lâminas também são colocadas nesses pinos que conectam os rotores entre si, de modo a fazerem girar o rotor para a produção de energia elétrica [90].

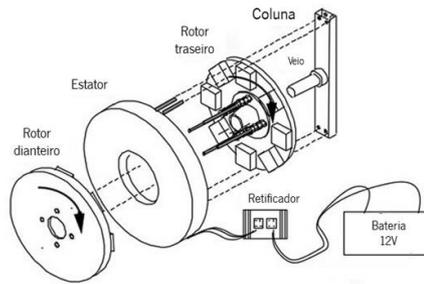


Figura 79 – Princípio de funcionamento do gerador síncrono de ímãs permanentes (adaptado de [90]).

E2.1 Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [91]

- Tamanho reduzido;
- Perdas reduzidas;
- Alta eficiência.
- Maior estabilidade de tensão e frequência devido ao sincronismo da velocidade do rotor e do campo magnético giratório.

❖ Desvantagens [91]

- Difícil ajuste e controlo do campo magnético;
- Desmagnetização irreversível no caso de mau dimensionamento ou uso impróprio, quando a temperatura do gerador de ímã permanente é muito alta (ímã permanente NdFeB) ou muito baixa (ímã permanente de ferrite);
- Elevado custo dos materiais dos ímãs permanentes, o que encarece o gerador de ímãs permanentes.

E2.2 Aplicações [90] [91]

- Turbinas a vapor;
- Turbinas a gás;
- Hidroturbinas;
- Eletrodomésticos;

- Automóveis;
- Dispositivos médicos.

E3. Geradores de corrente contínua

A principal função dos geradores de corrente contínua (CC) é transformar a energia mecânica em eletricidade. Existem muitas fontes que fornecem energia mecânica para geradores CC, como motores de combustão interna, turbinas de água, gás e vapor, e até mesmo manivelas manuais.

Os geradores CC produzem energia elétrica com base no princípio da Lei de Faraday da indução eletromagnética. Com base nesta lei, quando um condutor se move num campo magnético, as linhas de força magnéticas são cortadas. Isso leva a uma indução de força eletromagnética no condutor [92].

Os componentes mais importantes de um gerador de corrente contínua são o estator, o rotor, o comutador e as escovas. De seguida é feita uma descrição da função de cada componente no gerador [93] [94]:

➤ Estator

A principal função é fornecer os campos magnéticos onde as bobinas giram. Isso inclui ímanes estáveis, onde dois deles estão voltados para os polos inversos. Esses ímanes estão localizados de forma a ajustarem-se ao rotor.

➤ Rotor

Existem lâminas de ferro com fendas no rotor com fendas colocadas para formarem um núcleo de armadura cilíndrica. Geralmente, as perdas são diminuídas devido à corrente parasita nessas lâminas.

➤ Comutador

O comutador funciona como um retificador para converter a tensão CA em tensão CC no reforço do enrolamento da armadura. Possui um segmento de cobre em que cada um, com o auxílio de folhas de mica, é protegido dos segmentos que o rodeiam. O comutador num gerador de corrente contínua substitui os anéis coletores dos geradores de corrente alternada, residindo aqui a principal diferença na sua construção.

➤ Escovas

Com o auxílio de escovas é garantida a conexão elétrica entre o comutador e o circuito de carga externa.

A mudança na forma de energia acontece com base no princípio da indução eletromagnética, o que significa que sempre que uma mudança no fluxo magnético ocorre associada a um condutor, uma força eletromotriz ou uma força eletromagnética é induzida nele. Esta indução faz com que uma corrente flua caso o circuito condutor seja fechado.

O princípio de funcionamento do gerador CC é baseado nas leis de indução eletromagnética de Faraday. Quando um condutor está localizado num campo magnético instável, uma força eletromotriz é induzida dentro do condutor. A magnitude desta f.e.m. induzida pode ser medida a partir da equação da força eletromotriz de um gerador.

Neste gerador, as bobinas de campo irão gerar um campo eletromagnético, assim como os condutores da armadura são colocados no campo. Portanto, uma força eletromotriz induzida eletromagneticamente será gerada dentro dos condutores da armadura.

O ciclo é paralelo às linhas de fluxo magnético, e nenhuma tensão é induzida no ciclo. Neste ponto, as escovas estão em contacto com ambos os segmentos do comutador, com esta posição a ser designada de plano neutro (**Figura 80**) [94].

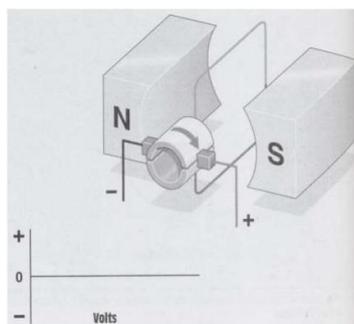


Figura 80 – Posição 0° (Plano CC neutro) [94].

Conforme o ciclo gira, os condutores começam a cortar as linhas de fluxo magnético. O condutor corta as linhas de campo magnético sul, sendo conectado à escova do lado positivo, e o condutor que corta as linhas de campo magnético norte está conectado à escova do lado negativo. Uma vez que o ciclo corta linhas de fluxo, a tensão é induzida no ciclo. Após uma rotação de 90°, a tensão atinge o valor máximo positivo (**Figura 81**) [94].

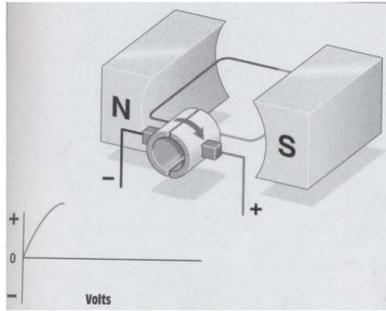


Figura 81 – Posição 90° (Plano CC) [94].

À medida que o ciclo continua a girar, a tensão diminui até zero. Após uma rotação de 180°, os condutores ficam novamente paralelos às linhas de fluxo, sem indução de tensão no ciclo. As escovas entram novamente em contacto com ambos os segmentos do comutador quando não há tensão induzida nos condutores (**Figura 82**) [94].

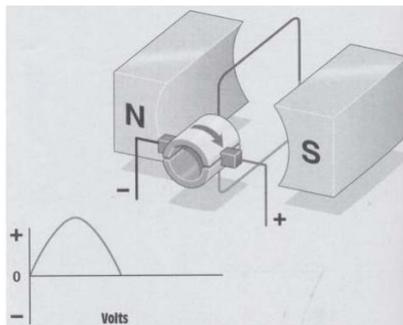


Figura 82 – Posição 180° (Plano CC) [94].

Nos 90° seguintes, os condutores cortam novamente as linhas de fluxo magnético. Desta vez, porém, o condutor que anteriormente cortava as linhas de fluxo no campo magnético sul, passa a cortar as linhas de fluxo do campo magnético norte e vice-versa.

Uma vez que esses condutores cortam linhas de fluxo magnético de polaridades opostas, a polaridade da tensão induzida é diferente para cada um dos condutores.

O comutador, no entanto, mantém o polaridade correta para cada escova. O condutor que corta o campo magnético norte está sempre conectado à escova do lado negativo, e o condutor que corta o campo magnético sul liga-se à escova do lado positivo.

Uma vez que a polaridade nas escovas permanece constante, a tensão aumenta para o seu valor de pico na mesma direção (**Figura 83**) [94].

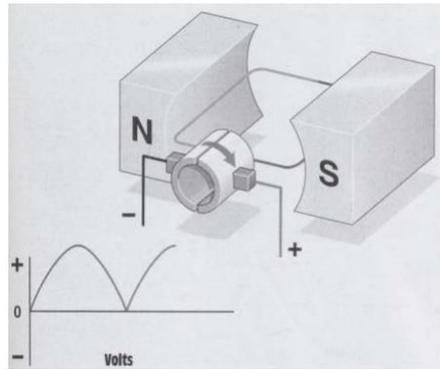


Figura 83 – Posição 270° (Plano CC) [94].

À medida que o ciclo continua, a tensão induzida volta a ser zero, coincidindo com o paralelismo dos condutores em relação às linhas de fluxo magnético. É possível observar que neste ciclo de 360° a polaridade da tensão permaneceu igual para ambos os lados da onda, a que se chama tensão de corrente contínua retificada.

A tensão está a pulsar, o que faz com que ligue e desligue sem nunca inverter a polaridade. Dado que a polaridade de cada escova permanece constante, a tensão de saída é em corrente contínua (Figura 84) [94].

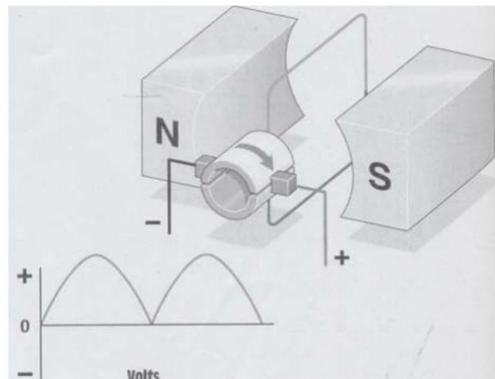


Figura 84 – Posição 0° (Plano CC neutro) [94].

E3.1 Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [92] [95]

- Desenho simples;
- Leves e compactos;
- Necessita de menos equipamento auxiliar.

❖ Desvantagens [92] [95]

- Não pode ser aplicado a um transformador;
- Baixa eficiência;
- Custo elevado;
- Muita manutenção.

E3.2 Aplicações [92]

- Usado na galvanoplastia;
- Máquinas de solda de CC;
- Fonte de alimentação para albergues, alojamentos, escritórios, etc.;

E4. Geradores de indução

Um gerador de indução ou gerador assíncrono é um tipo de gerador elétrico de corrente alternada (CA), que usa os princípios dos motores de indução para produzir energia elétrica. Na verdade, um gerador de indução inicialmente funciona como um motor, com a mudança para gerador a ocorrer quando é conectado a um sistema de energia elétrica e, em seguida, acionado acima da sua velocidade síncrona por algum motor principal (turbina, moinho de vento ou qualquer máquina capaz de fornecer o binário e velocidade necessários para conduzir o motor na condição de velocidade excessiva). Se o rotor for acelerado até a velocidade síncrona usando um dos motores principais mencionados acima, o escorregamento será zero e, portanto, o torque líquido será zero. A corrente do rotor será nula quando o rotor estiver a funcionar com velocidade síncrona.

Então, a velocidade do gerador é aumentada acima da velocidade síncrona por um motor principal externo. A velocidade é aumentada na mesma direção do campo giratório produzido pelos enrolamentos do estator [96].

Esta corrente do rotor gerada produz um campo magnético giratório no rotor que força na direção oposta ao campo do estator. Isso causa uma tensão do estator que empurra a corrente que flui para fora do enrolamento do estator contra a tensão aplicada. Assim, o motor passa a funcionar como gerador de indução ou, como é normalmente conhecido, gerador assíncrono [97].

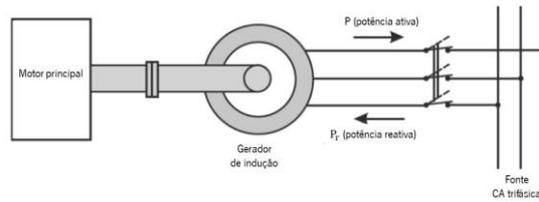


Figura 85 – Motor de indução a trabalhar como gerador (adaptado de [98]).

As características de desempenho do gerador variam ligeiramente em comparação às de um motor. Em geral, o escorregamento e o fator de potência serão menores e a eficiência será maior. As diferenças podem ser tão pequenas a ponto de serem indetectáveis pelos métodos normais de medição de campo.

A saída do gerador de indução depende dos seguintes fatores [96]:

- magnitude do escorregamento negativo;
- velocidade do rotor ou a velocidade com que o motor se move acima da velocidade síncrona na mesma direção;
- rotação do motor quando funciona como motor de indução.

E4.1 Vantagens e desvantagens

❖ Vantagens [99]

- Menor manutenção, dada a sua construção robusta;
- Menor proeminência da variação da velocidade do motor principal;
- Necessita de menos equipamento auxiliar.

❖ Desvantagens [100]

- Não é adequado para operações separadas e isoladas;
- Não pode contribuir para a manutenção dos níveis de tensão do sistema (isso é deixado inteiramente para os geradores síncronos);
- Menor eficiência.

E4.2 Aplicações [101]

- Turbinas eólicas;

- Hidroturbinas;
- Motores a gasolina alimentados por gás natural ou biogás;
- Cogeração.

ANEXO F – SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Além das baterias, existem outras tecnologias que permitem armazenar energia, sendo de menor conhecimento geral por apresentarem baixo rendimento, elevado custo e complexidade, que impede o desenvolvimento para implementação em larga escala.

F1. Sistema de Recuperação da Energia Cinética (KERS)

O conceito KERS (*Kinetic Energy Recovery System*) consiste num sistema que acumula energia proveniente das desacelerações ou das descidas e a reintroduz nas acelerações ou subidas.

O funcionamento do sistema divide-se num sistema elétrico e mecânico. O primeiro armazena a energia cinética proveniente das travagens, através da rotação do eixo do gerador, convertendo-a em energia elétrica e armazena-a em baterias ou condensadores.

Nas travagens, o controlador coloca a embraiagem no sistema KERS, de modo a ligar o gerador ao eixo traseiro. Quando há necessidade de aceleração, o controlador transmite à embraiagem que é necessário voltar a ligar o motor ao eixo traseiro [102].

O sistema desenvolvido pela Flybrid (**Figura 86 a**), usado na Fórmula 1, roda em vácuo através do atrito existente com o ar, possuindo uma vedação especial patenteada pela marca. No que respeita aos rolamentos, estes encontram-se fora da zona de vácuo de modo que o sistema seja arrefecido e lubrificado [2].

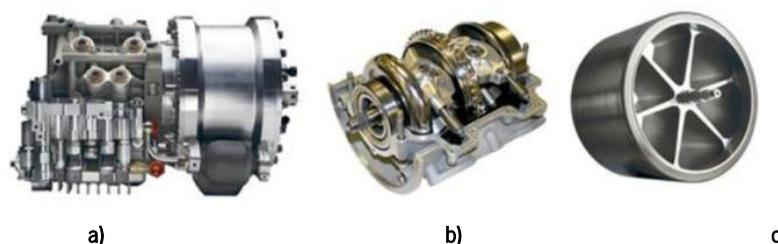


Figura 86 – a) sistema *KERS* desenvolvido pela Flybrid, b) corte da transmissão toroidal da Xtrac, c) volante de inércia (adaptado de [103] [104]).

Em suma, os principais obstáculos ao desenvolvimento e aplicação do sistema KERS em automóveis, devem-se [2]:

- ao atrito;
- à sensibilidade a choques;
- à resistência dos materiais à força centrífuga;

- ao preço;
- à instabilidade do veículo devido ao efeito de giroscópio;
- ao ruído.

F2. Sistema hidráulico (HRB)

O sistema HRB (*Hydraulic Regenerative Brake*) utiliza a energia da travagem regenerativa para bombear um fluido de um reservatório de baixa pressão para um outro de alta pressão. Dada a incompressibilidade do fluido hidráulico, a pressão é criada por um gás (azoto) previamente colocado nesse depósito dentro de um balão [2].

No processo de aceleração do veículo, a bomba passa a motor hidráulico, auxiliando assim o motor de combustão interna. A Bosch Rexroth Corporation (**Figura 87**) desenvolveu um sistema com o qual pretende avaliar a confiabilidade e a economia de combustível [105].

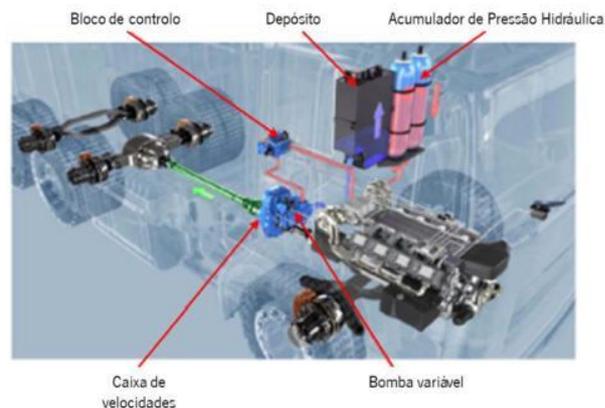


Figura 87 – Sistema HRB desenvolvido pela Bosch Rexroth (adaptado por [106]).

Atualmente os sistemas HRB têm a sua aplicação restringida aos protótipos, uma vez que ainda apresentam alguns problemas como fugas, ruído elevado e bastante espaço requerido pelos reservatórios.

ANEXO G – CARREGADORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

As baterias dos veículos elétricos necessitam de ser carregadas com corrente contínua. Contudo, a rede fornece corrente alternada, pelo que o carregador tem também de funcionar como conversor de tensão.

Os carregadores desempenham um papel importante na evolução da mobilidade elétrica, dado que o tempo de carregamento das baterias e a sua vida útil estão relacionados com os mesmos. Os carregadores das baterias dos devem ter as seguintes características [11]:

- eficiência e fiabilidade;
- grande densidade de potência;
- baixo custo, massa e tamanho;
- corrente fornecida pela fonte de alimentação deve ser praticamente sinusoidal, para evitar um grande impacto na qualidade de energia;
- alto fator de potência, de forma a maximizar a potência real fornecida pela instalação elétrica.

O carregador geralmente vem integrado no próprio sistema do veículo elétrico, com a carga a poder ser feita durante a noite, o que permite usufruir de uma tarifa mais económica. As cargas lentas podem demorar cerca de 8 horas, razão pela qual os fabricantes oferecem a possibilidade de efetuar cargas rápidas de forma a obter normalmente 80% da carga total. No entanto, quanto mais rápida for a carga, menor poderá ser o tempo de vida das baterias, conforme a sua tecnologia [2].

Os carregamentos rápidos produzem maior quantidade de calor nas baterias, o que provoca a degradação da bateria. Algumas baterias possuem sistemas de arrefecimento de forma a mitigar o problema das cargas rápidas, tal como as tecnologias presentes na **Figura 88**:

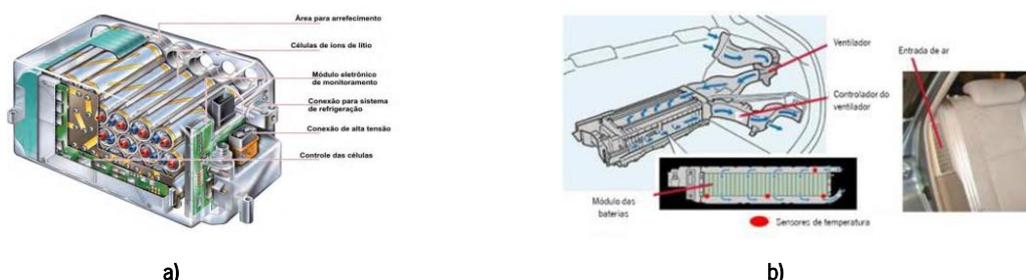


Figura 88 – a) Bateria do Mercedes S400 *BlueHybrid* [107], b) Bateria do Toyota Prius (adaptado de [108]).

No sistema da Mercedes, a bateria é arrefecida com o sistema de ar condicionado do carro, através

de um evaporador (em forma de placa) colocado junto às baterias. Já o sistema da Toyota funciona por ar ventilado.

Outra tecnologia desenvolvida pela Honda no modelo EV-neo, atua em situações em que a bateria possa estar relativamente fria (como no Inverno ou nos primeiros quilômetros), afetando o rendimento da bateria. Foi então desenvolvido um sistema que atua quando a bateria se encontra fria, com o controlador a atuar de forma limitada até que a bateria aqueça (com a descarga provocada pelo funcionamento do motor). Para temperaturas acima de um nível definido, é ligado um ventilador que força a entrada de ar para a caixa da bateria, arrefecendo-a [2].

O carregamento das baterias pode ser efetuado por carregadores *on-board* e *off-board*. Na **Figura 89** observa-se que para um fluxo de potência de forma unidirecional, o mesmo ocorre no sentido das setas de sentido único, a laranja. Na transferência do fluxo de potência bidirecional, os conversores são bidirecionais, pelo que o fluxo será bidirecional (setas a verde).

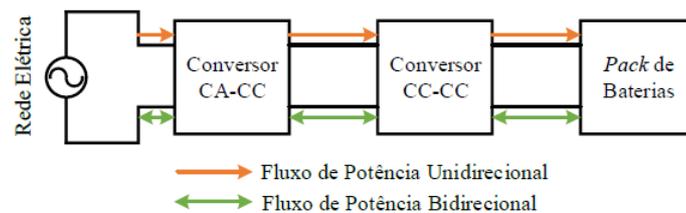


Figura 89 – Esquema genérico da transferência de potência unidirecional e bidirecional [11].

Os carregadores *on-board* encontram-se integrados na arquitetura dos veículos, pelo que são mais aptos à utilização por parte dos utilizadores. A necessidade de diminuir o tamanho e massa dos mesmos, por se encontrarem no interior do veículo, provoca limitações a nível da potência que podem fornecer às baterias, pelo que se destinam a carregamentos de longa duração, como por exemplo durante a noite.

Já no que diz respeito aos carregadores *off-board*, estes assemelham-se aos tradicionais postos de abastecimento para os veículos com motor de combustão interna, servindo neste caso para efetuar o carregamento rápido das baterias [11].

G1. Carregadores rápidos

Atualmente existem diversas empresas empenhadas no conceito da mobilidade elétrica, através do desenvolvimento de carregadores para veículos elétricos.

Dentro destas empresas existe um nicho delas que produzem carregadores rápidos para VE's, das quais se destacam [2] [11]:

- Magnum Cap;
 - EFACEC;
 - ABB;
 - Bosch;
 - Eaton;
 - Schneider Electric.
- **Magnum Cap MCR 63**

A Magnum Cap é uma empresa portuguesa que desenvolve equipamentos eletrónicos para fazer a gestão, controlo e distribuição de energia. Atualmente produzem sistemas de carregamento para veículos elétricos, tendo soluções para carregamento de veículos de duas ou quatro rodas, com carregadores normais, residenciais ou de carregamento rápido. Um dos carregadores rápidos produzidos apresenta-se na **Figura 90**. Este carregador foi desenvolvido para carregamento de todos os veículos elétricos que estejam de acordo com o padrão IEC 6181.



Figura 90 – Magnum Cap MCR63 [109].

O carregador rápido Magnum Cap MCR63 caracteriza-se por ser um sistema compacto, inteligente e seguro que integra uma interface amigável na ótica do utilizador, com o recurso a uma interface gráfica (*display*) e um teclado capacitivo (sensível ao toque). Existe uma API (*Application Programming Interface*) que permite a gestão e integração da estação de carregamento, sendo possível comunicação com a mesma através da rede móvel 3G ou *ethernet*. Com o uso deste tipo de carregador é possível, dependendo do veículo elétrico, um carregamento total das baterias em menos de trinta minutos [11].

▪ Efacec QC45

A Efacec é uma empresa portuguesa criada em 1948, sendo uma das maiores referências em todo o mundo nos setores da Energia, do Ambiente e Indústria, da Mobilidade e dos Transportes.

De entre os diversos modelos de sistemas para o carregamento rápido destaca-se o modelo QC45 (Figura 91), apresentada na sua 2ª geração [110].

As principais características da 2ª geração do carregador rápido QC45 são [111]:

- Carregador rápido, compatível com todas as marcas de veículos elétricos;
- Carregamento de um veículo elétrico (80%) em menos de 30 minutos;
- Instalação *plug & play* simples;
- Potência de saída CC: superior a 50 kW | CA: 22 kVA;
- Múltiplos *standards*: CHAdeMO, CCS e AC;
- Carga CC e CA em simultâneo.



Figura 91 – Efacec QC45 [111].

▪ ABB Terra 53

Em 1988, com a fusão da empresa sueca Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) com a empresa suíça Brown, Boveri & Cie (BBC) nasceu a multinacional Asea Brown Boveri (ABB), com sede em Zurique, sendo atualmente umas das maiores empresas do mundo na construção de redes elétricas [112].

Tal como a Efacec, a ABB concorre também na área da mobilidade elétrica, concretamente nos sistemas de carregamento para VE's.

Dentro da vasta gama de carregadores rápidos fabricados por parte da ABB, há a destacar os modelos Terra 53, que estão disponíveis em 7 configurações diferentes, com opções de *software* de limitação da energia de entrada, para evitar dispendiosas atualizações da rede, nomeadamente: C (conetor CCS), CJ (conectores CCS e CHAdeMO), CT (CCS e tomada CA), CJT (CCS, CHAdeMO e tomada CA), CJG (CCS, CHAdeMO e cabo CA), CJ (CCS e CHAdeMO) e Z (GB/T) presentes na **Figura 92** [113]:



Figura 92 – Possíveis configurações do Terra 53 (da esquerda para a direita): Terra 53 C, Terra 53 CJ, Terra 53 CT, Terra 53 CJT, Terra 53 CJG, Terra CJ (EUA) e Terra 53 Z (China) [113].

Além do tipo de carregamento descrito anteriormente, o veículo pode ser carregado por indução. Este tipo de carregadores, já utilizado para carregar telemóveis, consiste em pousar o telemóvel sobre uma placa sem qualquer ligação de cabos.

Para os veículos elétricos existe um sistema de carga, o *Magna Charge*, que possui uma placa indutora na ponta do cabo, em vez do conetor, de forma a ser colocada numa ranhura recetora do veículo sem que exista qualquer contacto elétrico. O objetivo do carregamento por indução é proteger as pessoas de possíveis choques elétricos.

A Siemens em cooperação com a BMW tem vindo a desenvolver carregadores que são colocados no pavimento do local de estacionamento (**Figura 93**), ou em forma de tapete, que permite carregar o carro, sem fios e em parques de estacionamento [2].

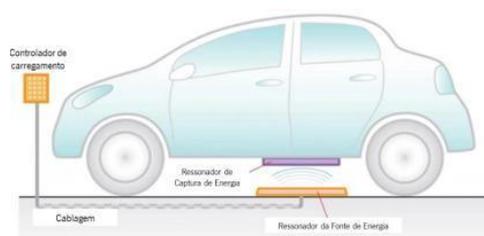


Figura 93 – Sistema de carga por indução da Delphi (adaptado de [114]).

G2. Conectores

Para a utilização dos postos de carregamento dos veículos elétricos, além dos cabos existem os

conectores, sendo que na Europa a norma IEC-62196-2 estabelece três tipos de conectores: um para ligação ao veículo, do tipo Yazaki (SAE J1772) monofásico; e dois para ligação à estação de carregamento, dos quais um do tipo VDE-AR-E2623 (Mennekes), sem tampa obturadora e outro do tipo Alliance com tampa obturadora, ambos monofásicos ou trifásicos. Os postos MOBI.E usados em Portugal recorrem a conectores tipo SCAME (IEC 309-2) e Mennekes (IEC 62196).

Grande parte destes conectores possuem, além dos pinos de potência e ligação à terra, pinos de comunicação e controlo, e um pino de proximidade (por questões de segurança) que indica que a tomada está inserida. Possuem ainda um pino de bloqueio que impede que sejam retirados durante o processo de carregamento [2] [115].

Existe uma grande variedade de tipos de conectores, tal como se vê na **Figura 94**:



IEC 60309 (usado no MOBI.E)



Mennekes (IEC 62196 – Tipo 2, usado no MOBI.E)



SAE J1772



SAE Combo 1 (J1772 + Carga rápida)



SAE Combo 2 (Mennekes + Carga rápida)



GB/T China (IEC 61851-23-1)



CHAdeMO (IEC 61851-23,-24 E 62196-3)



Alliance (Legrand, SCAME e Schneider)

Figura 94 – Sistemas de ligação a veículos elétricos, e respetivas normas, protocolos (CHAdeMO) ou alianças (Legrand, SCAME e Schneider) [116][117][118][119][120][121][122].

ANEXO H – CARACTERÍSTICAS DO CITROËN C1

Tabela 37 – Ficha técnica do Citroën C1 [55].

Dimensions & capacities	
Length:	3466 mm / 136.5 in
Width:	1615 mm / 63.6 in
Width with mirrors:	1884 mm / 74.2 in
Width folded back mirrors:	
Height:	1460 mm / 57.5 in
Height with roof rails or antenna:	
Height full load:	
Wheelbase:	2340 mm / 92.1 in
Front track:	1425 mm / 56.1 in
Rear track:	1420 mm / 55.9 in
Ground clearance:	120 mm / 4.7 in
Ground clearance full load:	
Turning circle btw. walls:	
Turning circle btw. curbs:	9.6 m / 31.5 ft
Drag coefficient Cd claimed:	0.29
Drag coefficient Cd estimated by a-c:	
Frontal area A claimed:	2.03 m²
Frontal area A estimated by a-c:	
Drag area CdA claimed:	0.589 m²
Drag area CdA estimated by a-c:	
Interior dimensions:	
Length-Legroom:	
1st row:	
2nd row:	
3rd row:	
Width-Shoulder room:	
1st row:	53.8 in / 1366 mm
2nd row:	52.6 in / 1337 mm
3rd row:	
Height-Headroom:	
1st row:	37.2 in / 945 mm
2nd row:	32.7 in / 831 mm
3rd row:	
Width-Hiproom:	
1st row:	52.6 in / 1336 mm
2nd row:	52.45 in / 1332 mm
Claimed EPA passenger volume:	
Calculated EPA passenger volume:	
Interior length:	1612 mm / 63.5 in
Interior width:	
Interior height:	

Tabela 38 – Massas do Citroën C1 [55].

Weights	
Curb weight (without a driver):	840 kg / 1852 lbs
Weight distribution f/r (%):	
Dry weight:	
Shipping weight:	
Curb weight estimated:	
Gross vehicle weight rating GVWR:	1240 kg / 2734 lbs
Payload:	400 kg / 882 lbs
Payload estimated:	
Towing weight:	
unbraked:	0 kg / 0 lbs
braked:	0 kg / 0 lbs

Tabela 39 – Sistema de propulsão do Citroën C1 [54].

Powertrain	
Engine manufacturer:	Toyota 1KR-FE
Engine type:	spark-ignition 4-stroke
Fuel type:	gasoline (petrol)
Fuel system:	gasoline indirect injection
Charge system:	naturally aspirated
Valves per cylinder:	4
Valves timing:	VVT-i (Variable Valve Timing with intelligence)
Additional features:	Multi-point fuel injection Start-Stop system
Emission control:	3-way catalyst, Lambda-Sensor
Emission standard:	Euro 6d
Cylinders alignment:	Line 3
Displacement:	998 cm³ / 61.1 cui
Bore:	71 mm / 2.8 in
Stroke:	84 mm / 3.31 in
Compression ratio:	11.5 : 1
Horsepower net:	53 kW / 72 PS / 71 hp (ECE) / 6000
Torque net:	93 Nm / 69 ft-lb / 4400

Tabela 40 - Sistema de propulsão do Citroën C1 [54].

Horsepower gross:	
Torque gross:	
Redline rpm:	
Car power to weight ratio net:	63.1 watt/kg / 28.6 watt/lb
Car power to weight ratio gross:	
Car weight to power ratio net:	15.8 kg/kW / 11.7 kg/PS / 26.1 lbs/hp
Car weight to power ratio gross:	
Fuel capacity:	35 liter / 9.3 U.S. gal / 7.7 imp. gal

Tabela 41 – Sistema de transmissão do Citroën C1 [55].

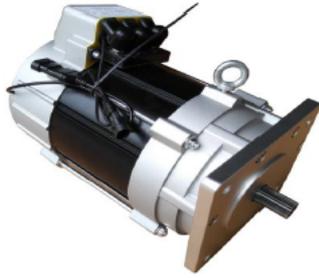
Drivetrain	
Gearbox:	
Transmission type:	manual
Number of gears:	5
Front brakes:	disc ventilated 247 mm / 9.7 in
Rear brakes:	drum 200 mm / 7.9 in
Standard tires:	165/65 R 14 79T

Tabela 42 – Prestações, consumos e emissões do Citroën C1 anunciados [54].

Factory claim	
Top speed:	160 km/h / 99 mph
0-60 mph (s):	13.2
0-100 km/h (s):	14
0-1/4 mile (s):	
0-1 km (s):	
Fuel consumption:	
ECE 90/120/city (comb.):	
EU NEDC/Australia ADR82:	4.3 / 3.4 / 3.7 l/100km
urban/extra-urban/combined	65.7 / 83.1 / 76.4 mpg (imp.) 54.7 / 69.1 / 63.5 mpg (U.S.) 23.3 / 29.4 / 27 km/l
U.S. EPA city/highway (combined):	
U.S. EPA (after 2008) city/highway: (combined)	
WLTP combined:	4.8 l/100km 58.9 mpg (imp.) 49.2 mpg (U.S.) 20.8 km/l
Emission:	85 gCO₂/km EU NEDC/Australia ADR82 108 gCO₂/km WLTP

ANEXO I- CARACTERÍSTICAS DO KIT SELECIONADO

Tabela 43 – Especificações do kit de conversão da marca Uni [57].

Item	Specification	U/P (USD)	Picture			
Motor	Rated power	10kw				
	Battery voltage	96v				
	Rated frequency	152Hz				
	Rated speed	4500RPM				
	Max. speed	6500RPM				
	Speed sensor	64 Pulse signal				
	Protection grade	IP55				
	Insulation grade	H				
	Max.torque	160 N.m				
	Size	Φ227* 380mm				
Net weight	40kg	550				
Controller	Rated voltage			96V DC		
	Working voltage range			65%~135%		
Key switch	Rated output current			104		
	Maximum output current			500A		
Stall switch	Digital input			8		
	Analog input			2		
Accelerator	Protection grade			IP65	570	
	Ambient temperature			-40°C~50°C		
Wire harness	Control mode			Vector control		
	Communication mode	/				
	Size (L*W*H)mm	328*253*113				
Gearbox	Net weight	7kg	175			
	Ratio	6:1				
	Speed capacity	8000RPM				
	Torque capacity	400 N.m				
	Noise	≤65dB				
Driving Shaft	HS code	87085079	110			
	Length	/				
	Output spindle	23 45°				
	Est. net weight	8kg				
	Packing	Wooden box				
DC-DC	Input voltage (V)	96	45			
	Output voltage(V)	12				
	Protection class	IP66				
	Max Output current	40A				
GPS vehicle speed display	Working voltage(V)	12~24	40			
	time					
	mileage					
	Speed					
	Size	13*7*1.7cm				
Charger	HS code	90329000	375			
	Input voltage (V)	220/110				
	Battery voltage (V)	96				
	Charging current (A)	30				
	HS code	85044099				
lithium Battery pack	voltage(V)	96	2620			
	Battery capacity(Ah)	130Ah				
	Size(mm)	Customized				
	Weight(Kg)	about 80				
Total		4485				

ANEXO J- DADOS TÉCNICOS DO GERADOR

Tabela 44 – Especificações do gerador considerado [59].

Permanent Magnet Generator



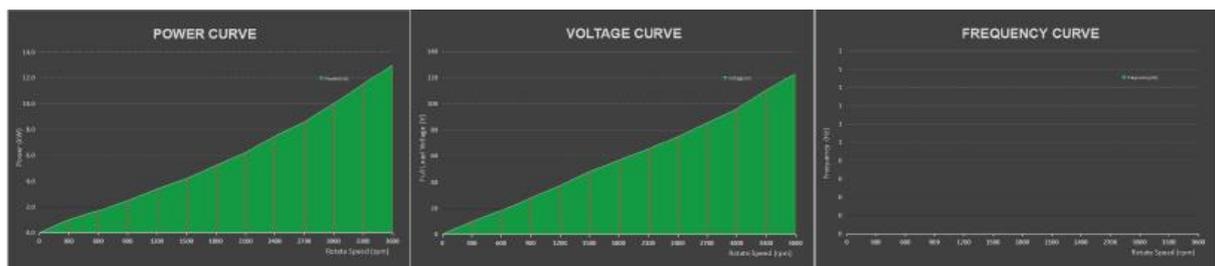
Leading Features

- ①. Direct drive simple structure .No gear-box .Brushless .
- ②. High efficiency >95% . Power factor close to 1.
- ③. Insert Nd-Fe-B Permanent magnet, clockwise & anticlockwise.
- ④. Low speed can generate high voltage and power.
- ⑤. Long life time >20years. 24 hours 365 days running .
- ⑥. Customized : Voltage, Speed, Power, Frequency etc.
- ⑦. 3 years free guarantee time.Life long service.

Model	GDF-132M
Rated power	10 kW
Rated rotate speed	3000 rpm
Rated voltage	96 Vac
Rated current	60.1 A
Start torque	0.5 N.M
Rated torque	32.3 N.M
Generator type	3 phase AC Synchronous generator
Magnet type	NdFeB
Winding Method	Y
Magnet temperature level	Max.120°C
Winding temperature level	Max.180°C
Efficiency	>95%
Insulate Grade	H
Insulating resistance	100Mohm Min(500Vdc)
Classification of degrees	IP54
Generator shell material	Cast Iron
Winding material	100% Copper
Shaft material	Steel
Iron Core	Cold rolled silicon steel sheet
Bearing brand	SKF
Cooling Method	Fan Cooling
Reference weight	64kg
Installation	Horizontal

Tabela 45 – Curvas de *performance* do gerador selecionado [59].

NO.	Model	Speed(rpm)	Power(KW)	Voltage (V)	Frequency(Hz)	
1	GDF-132M	0	0.0	0		
2		300	1.0	10		
3		600	1.7	18		
4		900	2.5	28		
5		1200	3.4	37		
6		1500	4.2	48		
7		1800	5.2	57		
8		2100	6.2	65		
9		2400	7.5	75		
10		2700	8.6	85		
11		Rated	3000	10.0	96	
12			3300	11.5	110	
13		3600	13.0	123		



ANEXO K – DADOS TÉCNICOS DO MOTOR HONDA GX 270

Tabela 46 – Especificações do motor de combustão GX 270 [61].

Parâmetro	Valor
Motor	Gasolina OHV a 4 tempos refrigerado a ar motor, cilindro inclinado 25°, eixo horizontal
Diâmetro x Curso	77 x 58 mm
Cilindrada	270 cm ³
Taxa de compressão	8,2:1
Potência máxima de saída	6,6 kW / 3 600 rpm
Binário máximo	19,1 Nm / 2 500 rpm
Sistema de ignição	Transistorizado
Sistema de arranque	Recuo (arranque elétrico opcional)
Capacidade do depósito de combustível	6 l
Consumo específico de combustível	313 g/ kWh
Capacidade de óleo do motor	1,1 l
Dimensões (comprimento x largura x altura)	380 x 430 x 410 mm
Massa em seco	25 kg

ANEXO L – CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO DO MODELO CITROËN C1 NO CICLO DE CONDUÇÃO WLTC

As condições de simulação do ciclo de condução em relação às especificações do veículo, combustível e sistema de propulsão, bem como os níveis de limiar de potência e SoC são apresentados na **Tabela 47**.

Tabela 47 - Características do veículo e modos de operação considerados nas simulações do ciclo de condução.

Especificações do veículo	
Massa do veículo com motor convencional (kg)	1000
Massa do veículo sem motor convencional (kg)	931
Massa do motor elétrico (kg)	40
Massa do <i>range extender</i> (kg) (massa do motor de combustão adicionado massa do gerador)	89
Massa da bateria (kg)	80
Especificações do combustível	
Poder calorífico inferior do combustível (MJ/kg)	44
Densidade do combustível (kg/m ³)	760
Especificações do sistema de propulsão	
Capacidade total da bateria (kWh)	15
Capacidade da máxima da bateria no modo CD (kWh)	12
Potência máxima da bateria (kW)	60
Potência máxima do motor elétrico (kW)/eficiência média	30/90%
Eficiência média unilateral da bateria (carga e descarga)	93%
Potência do motor RE modo ECO (kW)/eficiência	6/29,4%
Potência do motor RE modo BOOST (kW)/eficiência	7/26,5%
Eficiência do gerador do RE / Tempo mínimo de funcionamento do RE (s)	90%/30
Níveis-limite de potência e SoC	
Potência máxima para o modo EV em CS (kW)	10

Limite inferior do SoC da bateria para o modo EV em CS	10%
Nível de SoC da bateria para mudar de CD para CS	20%
Intervalo de histerese entre os modos CS e CD	10%

Os dados para o veículo e o combustível usado referem-se ao modelo C1 da marca Citroën, que caracteriza um pequeno veículo citadino existente. As características da bateria e do motor elétrico referem-se ao *kit* selecionado. No que respeita ao *range extender*, os valores a usar terão como base os já referidos gerador (**Figura 47**) e motor térmico (**Figura 48**).

Os valores de potência e eficiência ECO e BOOST, que foram obtidos com base no catálogo do motor da Honda, permitiram fazer as simulações dos ciclos de condução para avaliar o consumo para os modos CD e CS [61].

Para a determinação do valor BSFC a considerar foi tido em conta o catálogo do motor Honda para o Gás de Petróleo Liquefeito (GPL) [123], dado possuir um valor de BSFC inferior, comparativamente à gasolina, mas manteve-se a gasolina como combustível no motor de combustão. A partir da tabela referente às propriedades do motor GX 390 verifica-se que o valor de BSFC é de 258 g/kWh.

Para obter a eficiência do motor térmico, é necessário ainda o valor referente ao PCI do GPL. Consultando as tabelas referentes aos valores de PCI para diversos combustíveis, verifica-se que o PCI do GPL é de 47,44 MJ/kg [124]. Dado que 1 kWh = 3,6 MJ, então obtém-se $PCI_{GPL} = 13,18$ kWh/kg. Com o valor anterior, a partir da expressão (39) começa-se por calcular o rendimento do motor no modo ECO, referente à velocidade de rotação de 2 750 rpm:

$$\begin{aligned}\eta_{mot,ECO} &= \frac{1\,000}{13,18 \times 258} \\ &= 29,4\%\end{aligned}$$

Já o valor do rendimento do motor no modo BOOST (4 000 rpm) é:

$$\begin{aligned}\eta_{mot,ECO} &= 0,9 \times 29,4\% \\ &= 26,5\%\end{aligned}$$

Embora os cálculos anteriores terem sido feitos com base no catálogo do motor a GPL, para efeitos de simulação, as restantes propriedades continuarão a ser relativas à gasolina.

Relativamente aos níveis-limite de potência e SoC, o modo EV funciona no modo CS sempre que a potência necessária é inferior a 10 kW e o SoC é superior a 10%. De referir também a existência de um

intervalo de histerese de 10% para a mudança entre os modos CS e CD, o que permite que o RE não ligue e desligue frequentemente. Pelo mesmo motivo, foi imposto um tempo mínimo de operação do *range extender*, que é, no ensaio com menor tempo de funcionamento, de 30 s, ou seja, sempre que o RE for ligado, ele só desligará após 30 segundos, mesmo que não seja necessário. No modo CS, quando o RE se encontra a funcionar no modo ECO, sempre que houver necessidade de energia exceder a potência ECO, a bateria fornecerá o excedente até sua potência máxima. No entanto, se o SoC estiver abaixo do valor mínimo definido para o modo EV, o modo BOOST é ativado em vez de usar a bateria.

Após a introdução de todos os dados necessários, a próxima etapa passa por prever o comportamento do motor elétrico, bateria e RE ao cumprir o ciclo nos modos CD e CS. Para tal, a estratégia usada consistiu em manter o modo CD ativo até que o estado de carga (SoC) caísse abaixo de 20%. Abaixo deste nível de SoC, o modo CS foi ativado, com uma margem de histerese de 10%, o que significa que o modo CD seria reativado sempre que o SoC ultrapasse os 30%.

O funcionamento do CD caracterizou-se por privilegiar o modo EV, no qual a eletricidade provém do armazenamento de energia, em detrimento do modo RE, em que o extensor de autonomia está ligado e fornece toda ou parte das necessidades de energia elétrica do veículo. No modo CD, o RE só estará ativo se a potência elétrica necessária for superior à energia elétrica fornecida pela bateria. Para o tempo mínimo de funcionamento do RE foi definido um atraso na desativação do mesmo, de modo que, se o RE for ligado, se desligue após o tempo definido, mesmo que a potência elétrica possa ser fornecida novamente somente pela bateria. O objetivo da implementação deste tempo prende-se com a necessidade de evitar demasiados arranques e paragens do motor.

O modo CS foi desenvolvido para privilegiar o uso do extensor de autonomia, ao invés do modo EV (*Electric Vehicle*), visto que sob este regime, o SoC do armazenamento de energia era muito baixo. Como tal, o modo EV estará ligado no modo CS se o requisito de energia for baixo (abaixo de 10 kW) e o SoC não for muito baixo (acima de 10%).

Importa salientar que os valores presentes na tabela anterior têm em conta exclusivamente os valores-padrão presentes no início das simulações. No entanto, o estudo irá abordar as seguintes variáveis que serão objeto de análise:

- capacidade total da bateria;
- potência máxima da bateria;
- tempo mínimo de funcionamento do *range extender*;

- SoC;
- massa do veículo.

ANEXO M – MÓDULOS USADOS NAS SIMULAÇÕES DO AVL CRUISE

M1. Módulo *Vehicle*

Inicialmente foi selecionado o módulo *Vehicle*, em que são apresentados os dados gerais do veículo, como dimensões e massas nominais.

As resistências dos percursos e as cargas dinâmicas das rodas são calculadas com base nas dimensões e nas cargas a que o veículo estará sujeito. As cargas das rodas são calculadas considerando o movimento (por exemplo, a partir dos efeitos da aceleração, arrasto aerodinâmico, resistência ao rolamento). Também são consideradas as resistências aerodinâmica, de rolamento, de subida, de aceleração e a resistência total [67].

Os valores dos parâmetros presentes na janela da aba *Vehicle* (Figura 95) apresentados anteriormente na Tabela 5 tiveram em conta os dados fornecidos na ficha técnica do modelo considerado [62], com alguns valores predefinidos no *software* a não sofrerem alterações.

De referir que, embora a massa em vazio e a massa bruta anunciadas pela marca sejam de, respetivamente, 840 kg e 1240 kg, no projeto foram considerados como massas 1000 kg e 1200 kg.

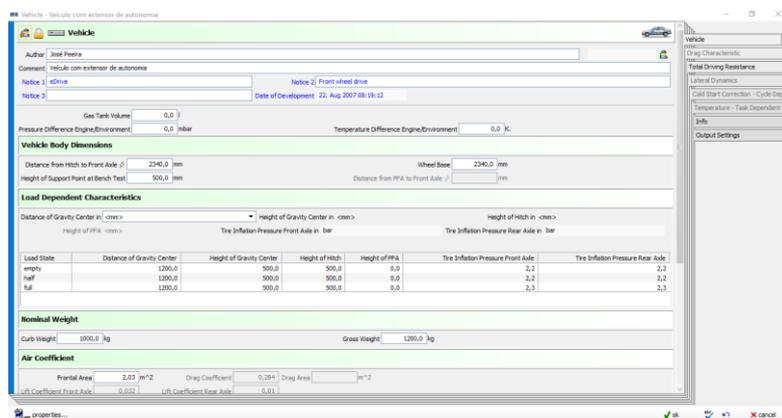


Figura 95 – Janela da aba *Vehicle* do módulo do veículo.

M2. Módulo *Battery*

O armazenamento de energia do veículo elétrico foi realizado a partir de 26 células de baterias de íons de lítio por fila, tendo cada célula uma tensão nominal de 3,7 V, o que perfaz os 96 V presentes no *kit* adotado. O número de filas de células foi fixado em 10, com a carga máxima a variar de acordo com a capacidade total da bateria pretendida. Como os valores pretendidos variam entre 7,5 kWh e 15 kWh, com incrementos de 2,5 kWh, e dado que a unidade SI presente no *software* é Ah, é necessário fazer a conversão para kWh, a partir da expressão:

$$kWh = \frac{Ah \times V}{1\,000} \quad (32)$$

As especificações da bateria considerada são mostradas abaixo na **Tabela 48**.

Como o fabricante do *kit* a usar nas simulações não forneceu o gráfico que relaciona a tensão em função do estado de carga, recorreu-se a um exemplo para o mesmo tipo de bateria, presente na **Figura 96** [125].

No gráfico é apresentada a relação através do *Open Circuit Voltage* (OCV), dado este método ser um importante parâmetro característico das baterias de iões de lítio, que é usado para estimar o estado de carga da bateria (SOC). Neste método, a relação SOC - OCV deriva da medição passo a passo da tensão em circuito aberto para diferentes valores do estado de carga [126].

Tabela 48 – Especificações da bateria [77] [69].

Parâmetros da bateria	
Capacidade (Ah)	130
Tensão máxima (V)	96
Tensão nominal (V)	3,7
Temperatura de funcionamento (°C)	25
Temperatura máxima de funcionamento (°C)	150
Massa (kg)	80
Dimensões (mm)	Personalizado

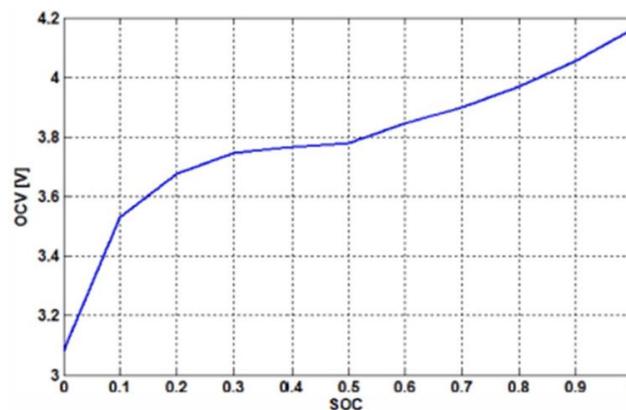


Figura 96 – Curva do OCV – SoC de uma bateria típica de iões de lítio [125].

Os dados apresentados anteriormente são então inseridos na janela referente ao módulo *Battery H* na aba com a mesma designação, a partir dos valores obtidos anteriormente, conforme apresentado

abaixo:

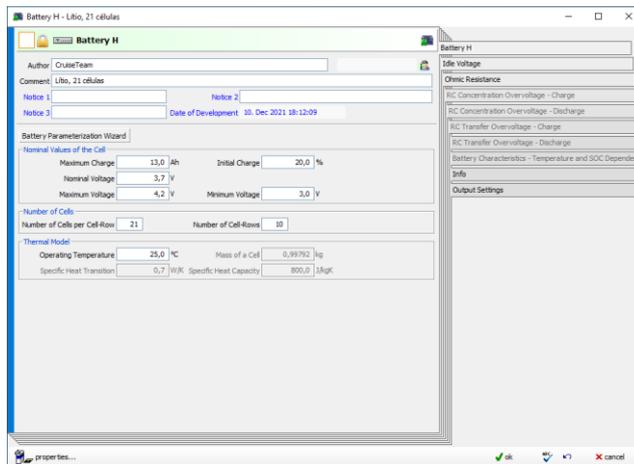
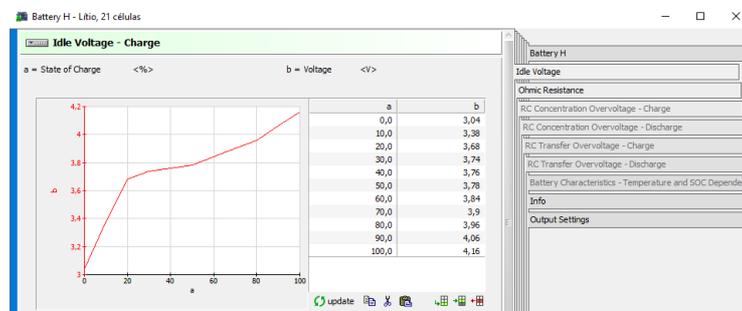


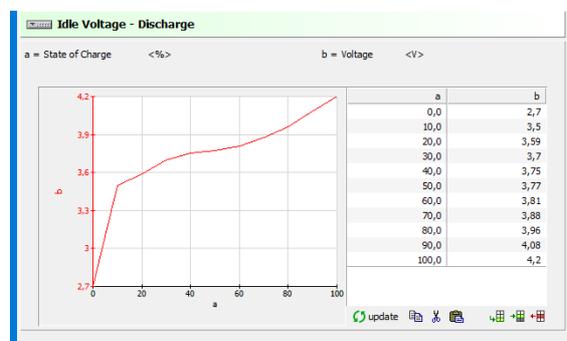
Figura 97 – Janela da aba *Battery H*.

Para efeitos de simulação, o estado inicial de carga considerado foi de 20%, dado ter sido o valor definido nas simulações em Excel para que ocorresse a mudança do modo *Charge Sustaining* para o modo *Charge Depleting* e assim entrar em funcionamento o *range extender*.

Ainda neste módulo há a possibilidade de editar a aba *Idle Voltage*, referente à tensão sem um consumidor elétrico, ou seja, sem fluxo de corrente. A tensão inicial da bateria depende da carga instantânea da bateria e foi obtida a partir de [125] [127]:



a)



b)

Figura 98 – Janela da aba *Idle Voltage* com a representação da tensão durante a) carga; b) descarga.

M3. Módulo *Electric Machine*

Dentro do módulo *Electric Machine*, tem-se a parte referente ao motor elétrico presente no *kit* selecionado e a parte referente ao gerador selecionado para constituir o *range extender*.

M3.1 Módulo referente ao motor elétrico

O modelo do motor elétrico foi baseado no motor de indução de CA com 10 kW de potência nominal e 96 V de tensão com um controlador de motor de 400 A. Os mapas característicos do motor relativos à potência mecânica máxima e à eficiência foram obtidos a partir das curvas de desempenho do motor elétrico do *kit* fornecidas pelo fabricante (**Figura 99**) [56], enquanto no que respeita à eficiência, o mesmo foi estimado [138]. As especificações do motor elétrico referente ao *kit* considerado são apresentadas na **Tabela 49**.

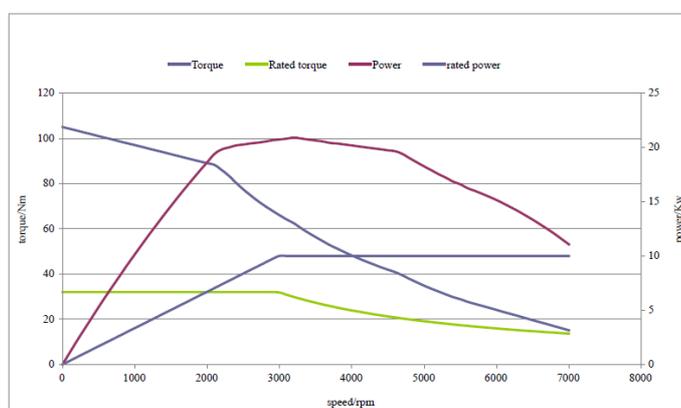


Figura 99 – Curva de teste do motor elétrico do *kit* selecionado [57].

Tabela 49 – Especificações do motor elétrico e do controlador do motor [57].

Especificações do motor elétrico	
Tensão nominal (V)	96
Frequência nominal (Hz)	152
Velocidade de rotação nominal (rpm)	4 500
Velocidade de rotação máxima (rpm)	6 500
Potência nominal (kW)	10
Potência máxima (kW)	30
Binário máximo (Nm)	160
Massa (kg)	40

Dimensões (mm)	Ø227 × 380
Especificações do controlador	
Tensão nominal (V)	96 CC
Corrente nominal de saída (A)	104
Corrente máxima de saída (A)	500
Temperatura ambiente (°C)	40 - 50
Massa (kg)	7
Dimensões (mm)	358 × 253 × 113

No *software*, a partir do módulo *Electric Machine* é possível editar os valores referentes ao motor elétrico. Primeiramente é apresentada a aba com o mesmo nome do módulo, na qual alguns valores são mantidos conforme apresentado, de modo a evitar futuros problemas na simulação. No entanto, é necessário alterar o campo *Characteristic Maps and Curves* para a opção *motor-related*, ao invés da predefinida *overall*, visto os valores referentes à curva de binário máximo e ao mapa de eficiência serem para velocidades e binários positivos. Posto isto, a janela apresentada encontra-se na **Figura 100**.

Dentro do módulo, na aba *Characteristic Maps of Machine*, são apresentados os gráficos referentes à potência mecânica máxima (**Figura 101 a**) e à eficiência (**Figura 101 b**).

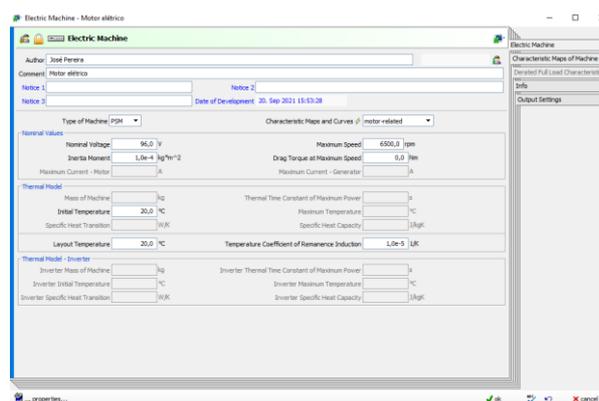
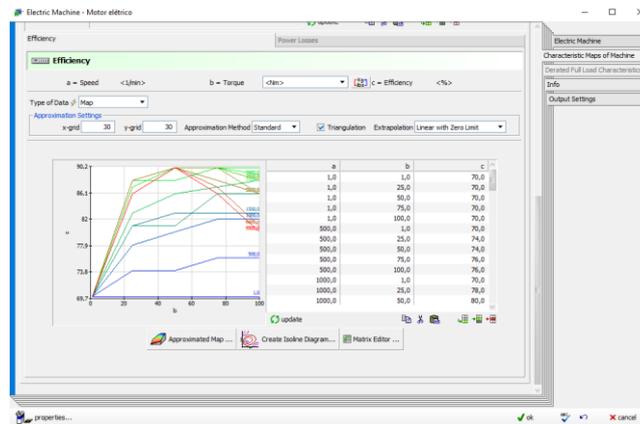


Figura 100 – Janela da aba *Electric Machine* do módulo do motor elétrico.



a)



b)

Figura 101 – Janela dos mapas característicos do motor elétrico relativos à: a) potência mecânica máxima; b) eficiência.

M3.2 Módulo referente ao gerador

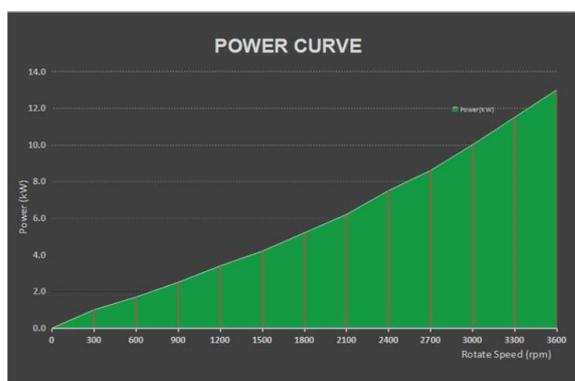
O gerador elétrico a implementar será acoplado a um motor de combustão, de modo a auxiliar o motor elétrico e arrancar o motor de combustão. Além disso, deve fornecer ao sistema elétrico do veículo uma alimentação de corrente suficiente em todas as condições de operação, a fim de garantir que o estado de carga no dispositivo de armazenamento do motor (bateria) seja mantido a um nível adequado. O objetivo passa então por obter um carregamento equilibrado, ou seja, as curvas de desempenho e resposta velocidade-frequência devem garantir que a quantidade de corrente gerada pelo alternador, em condições reais de operação, seja pelo menos igual ao consumo de todos os equipamentos elétricos no mesmo período.

O modelo do gerador usado teve em consideração o modelo fornecido pela empresa Greef, que possui a potência pretendida (10 kW), com valores de tensão, corrente e binário adequados aos objetivos do projeto.

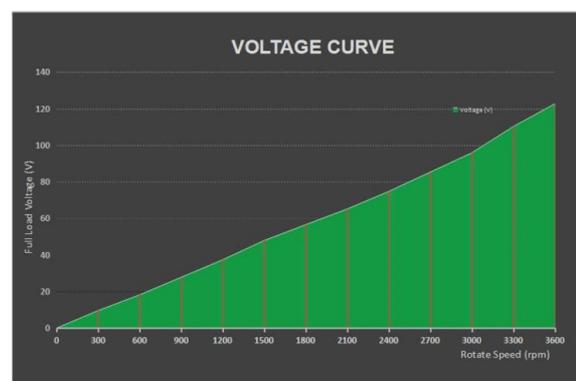
Neste módulo são igualmente considerados os mapas característicos do motor relativos à potência mecânica máxima, os quais tiveram em conta as curvas do teste de *performance* fornecidas pelo fabricante [131], e à eficiência, em que se recorreu à literatura existente [129]. As especificações do gerador considerado podem ser consultadas na **Tabela 50**.

Tabela 50 – Especificações do gerador [59].

Especificações do gerador	
Modelo	GDF-132M
Tensão nominal (V)	96 CA
Tensão máxima (V)	123
Velocidade de rotação nominal (rpm)	3 000
Potência nominal (kW)	10
Potência máxima (kW)	13
Corrente nominal (A)	60,1
Binário de arranque (N.m)	0,5
Binário nominal (N.m)	32,3
Tipo de gerador	Síncrono trifásico de CA
Temperatura máxima do íman (°C)	120
Temperatura máxima do enrolamento (°C)	180
Meio de refrigeração	Ventoinha
Massa de referência (kg)	64



a)



b)

Figura 102 – Curva do teste de *performance* do gerador relativa à: a) potência; b) tensão [121].

No *software* insere-se o módulo *Electric Machine*, em que, ao contrário do observado para o motor elétrico, a diferença reside na velocidade de rotação máxima, que neste caso é de 3 600 rpm.

Tal como se verificou no módulo anterior, a aba *Electric Machine* manteve os valores-padrão presentes no programa, à exceção do parâmetro referido no parágrafo anterior. No campo *Characteristic Maps and Curves*, pelas razões mencionadas no subcapítulo anterior, é selecionada a opção *motor-related*, conforme se pode ver na **Figura 103**.

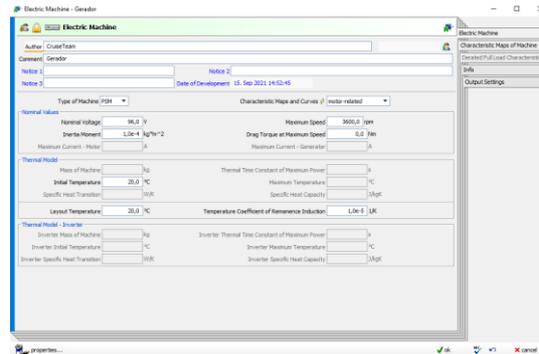
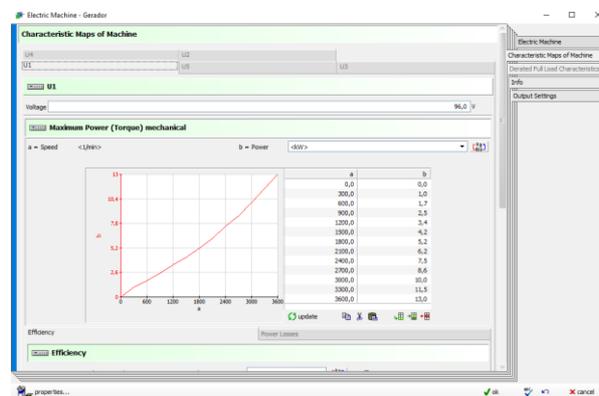
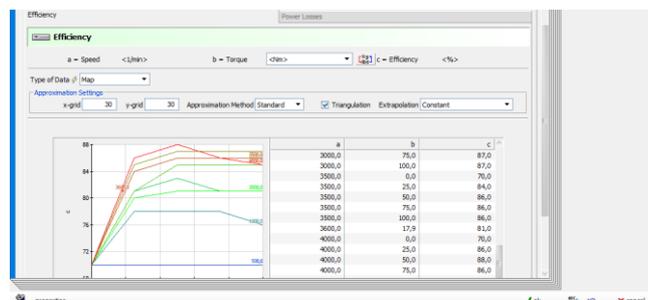


Figura 103 – Janela da aba *Electric Machine* do módulo do gerador.

Já no que respeita à aba *Characteristic Maps of Machine*, são apresentados os gráficos referentes à potência mecânica máxima (**Figura 104 a**) e à eficiência (**Figura 104 b**).



a)



b)

Figura 104 – Janela dos mapas característicos do gerador relativos à: a) potência mecânica máxima; b) eficiência.

M4. Módulo *Engine*

O modelo do motor construído no AVL Cruise tem em conta as especificações necessárias, baseadas no modelo GX 270 da Honda, com este a enquadrar-se nos parâmetros necessários para o motor a combustão a acoplar ao gerador [123].

Neste módulo é igualmente considerada a curva característica para o carregamento total, a qual teve em conta a curva de *performance* fornecida pelo fabricante [123]. As especificações do motor térmico considerado podem ser consultadas na **Tabela 51**.

Tabela 51 – Especificações do motor térmico [123].

Especificações do motor térmico	
Modelo	GX 270
Tipo de motor	Gasolina
Cilindrada (cm ³)	270
Temperatura de funcionamento (°C)	80
Número de cilindros	1
Número de tempos	4
Velocidade de rotação inicial (rpm)	750
Velocidade de rotação máxima (rpm)	4 000
Potência máxima de saída (kW)	6,6 (3 600 rpm)
Binário máximo (Nm)	19,1 (2 500 rpm)
Poder calorífico inferior (PCI) do combustível (kJ/kg)	44 000
Densidade do combustível (kg/l)	0,76
Massa (kg)	25

Com as especificações do motor térmico insere-se o módulo *Engine* no AVL. De seguida, dentro deste bloco aparece a aba *Engine*, onde se encontram os parâmetros referentes à geometria do motor e ao combustível considerado, que serviu de base aos valores considerados nas especificações do motor térmico (**Figura 105**).

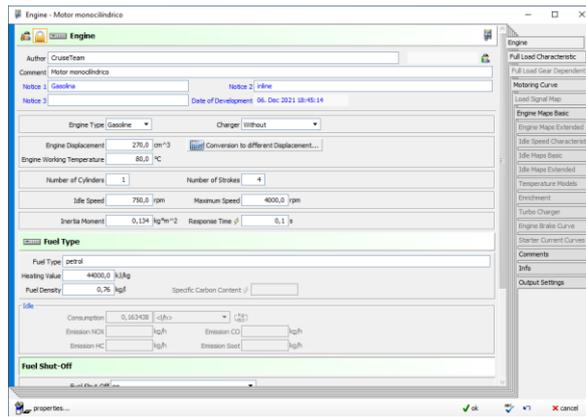


Figura 105 – Janela da aba *Engine* do módulo do motor térmico.

Na aba *Full Load Characteristic* é apresentado o gráfico referente à potência mecânica máxima (Figura 106), que tem por base o gráfico da Figura 107, embora com ligeiras adaptações.

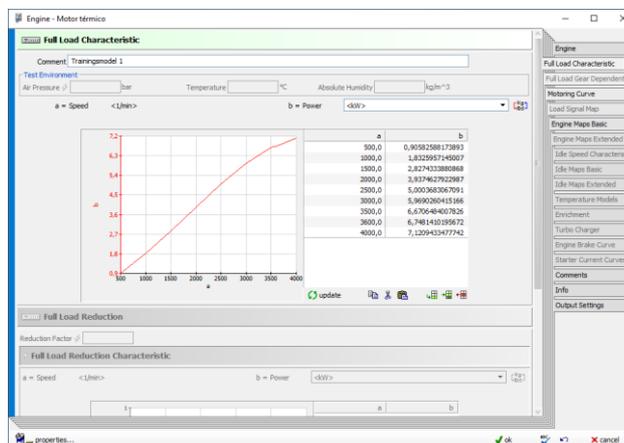


Figura 106 – Janela da aba *Full Load Characteristic* do módulo do motor térmico.

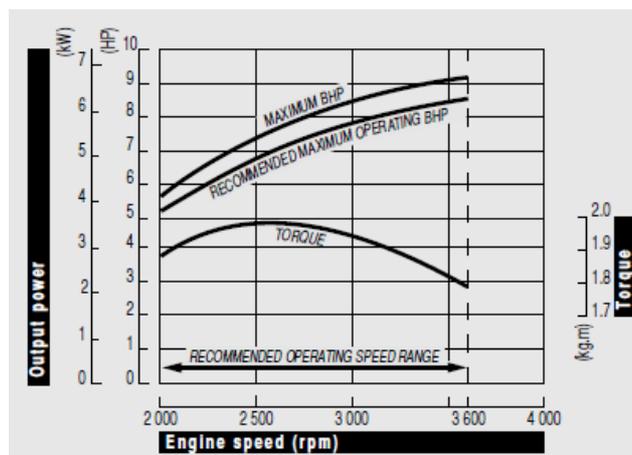


Figura 107 – Curva de performance do motor Honda GX 270 [132].

Posto isto, na aba *Motoring Curve* (Figura 108), o atrito do motor é descrito considerando o binário de arranque que o motor fornece ao longo da velocidade de rotação. Os valores considerados tiveram

em conta os valores-padrão definidos pelo programa.

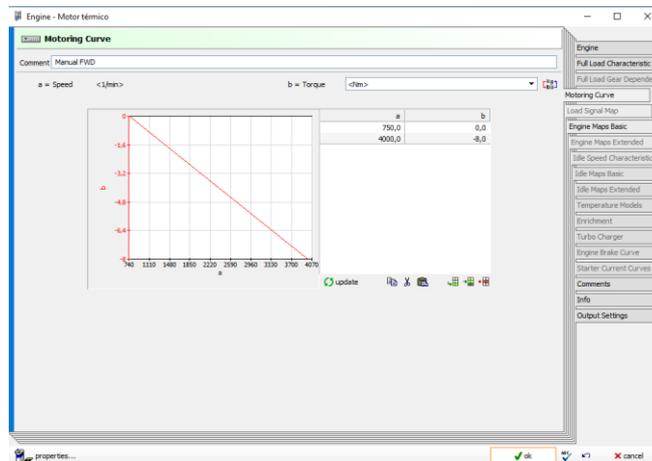


Figura 108 – Janela da aba *Motoring Curve* do módulo do motor térmico.

Já na janela *Engine Maps Basic*, na variável correspondente ao mapa de consumo de combustível, é feita uma representação gráfica, de modo a relacionar a pressão média do travão e o consumo de combustível para uma determinada rotação do motor. Os valores presentes no gráfico da Figura 109 tiveram em conta os valores presentes na literatura [140].

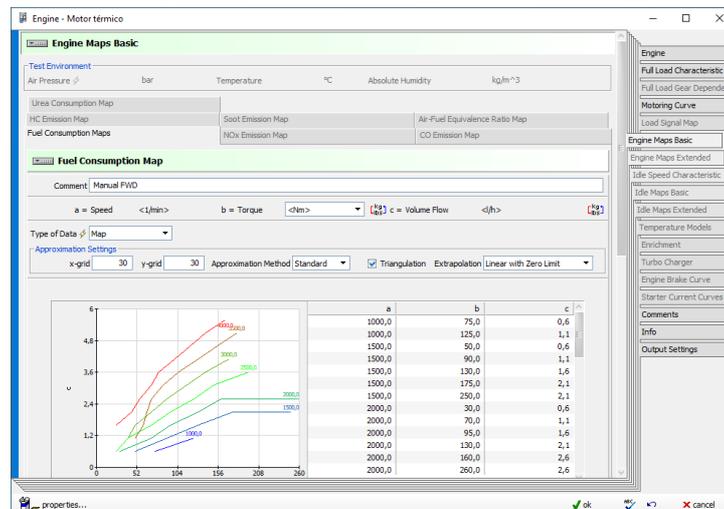


Figura 109 – Janela da aba *Engine Maps Basic* do módulo do motor térmico.

M5. Módulo *Wheel*

As rodas e os pneus são responsáveis pela ligação do veículo à estrada. No módulo *Wheel* são consideradas diversas variáveis e os seus efeitos no estado de rolamento.

O momento de arrasto de rolamento pode ser calculado com base na carga da roda, no raio de rolamento dinâmico corrigido e no coeficiente de arrasto de rolamento. A força longitudinal do pneu (força circunferencial) resulta do coeficiente de atrito, da carga da roda, bem como do fator de carga da

roda e do fator de escorregamento.

Este módulo permite ainda definir a resistência ao rolamento do pneu, em função da pressão de enchimento do pneu, carga, velocidade de translação, temperatura ambiente e tempo [69].

As especificações dos pneus considerados encontram-se descritas na **Tabela 52**:

Tabela 52 - Especificações dos pneus padrão [55].

Especificações dos pneus	
Dimensão do pneu padrão	165/65 R 14 79T
Largura do pneu (mm)	165
Relação da secção cruzada do pneu com a respetiva largura (%)	65
Tipo de construção interna	R (radial)
Diâmetro da jante (")	14
Índice de carga	79
Velocidade máxima suportada pelo pneu	T
Diâmetro total da roda (mm)	570

Relativamente aos dados apresentados anteriormente, o índice de carga corresponde a uma determinada carga, medida em quilos. A correspondência entre o índice de carga e a carga máxima encontra-se apresentada na **Tabela 53**.

Os índices de velocidade vão desde a letra A até Y, sendo que nos automóveis atuais, as referências mais usadas, por ordem crescente são:

- Q: 160 km/h;
- R: 170 km/h;
- S: 180 km/h;
- T: 190 km/h;
- H: 210 km/h;
- V: 240 km/h;
- ZR: mais de 240km/h;
- W: 270 km/h;

- Y: 300 km/h.

Tabela 53 – Relação entre o índice de carga e a carga máxima suportada pelo pneu (adaptado de [131]).

EQUIVALÊNCIA ENTRE O ÍNDICE DE CARGA E A CARGA MÁXIMA DETERMINADA PARA O PNEU									
ÍNDICE DE CARGA	CARGA MÁXIMA KG	ÍNDICE DE CARGA	CARGA MÁXIMA KG	ÍNDICE DE CARGA	CARGA MÁXIMA KG	ÍNDICE DE CARGA	CARGA MÁXIMA KG	ÍNDICE DE CARGA	CARGA MÁXIMA KG
60	250	71	345	82	475	93	650	104	900
61	257	72	355	83	487	94	670	105	925
62	265	73	365	84	500	95	690	106	950
63	272	74	375	85	515	96	710	107	975
64	280	75	387	86	530	97	730	108	1000
65	290	76	400	87	545	98	750	109	1030
65	300	77	412	88	560	99	775	110	1060
67	307	78	425	89	580	100	800	111	1090
68	315	79	437	90	600	101	825	112	1120
69	325	80	450	91	615	102	850	113	1150
70	335	81	462	92	630	103	875	114	1180

Na edição dos módulos referentes a cada roda (dianteira/traseira e esquerda/direita) foram considerados alguns valores-padrão predefinidos.

Ao inserir o módulo *Wheel* é possível selecionar qual a localização da roda em questão. Para tal, ao clicar caixa referente ao módulo aparece a opção *Properties* no canto inferior esquerdo. Selecionando esta opção, é aberta uma caixa, na qual se escolhe o local da roda considerada na opção *Wheel Location* (Figura 110).

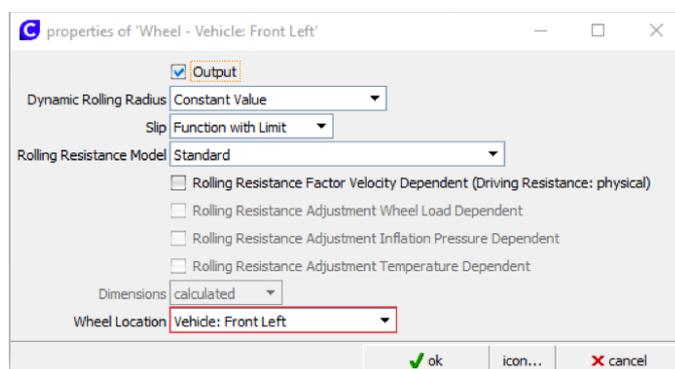


Figura 110 – Caixa de propriedades da roda.

Selecionada a localização da roda procede-se à introdução dos parâmetros referentes à mesma. Na aba *Wheel* são mantidos os valores dos parâmetros predefinidos (Figura 111).

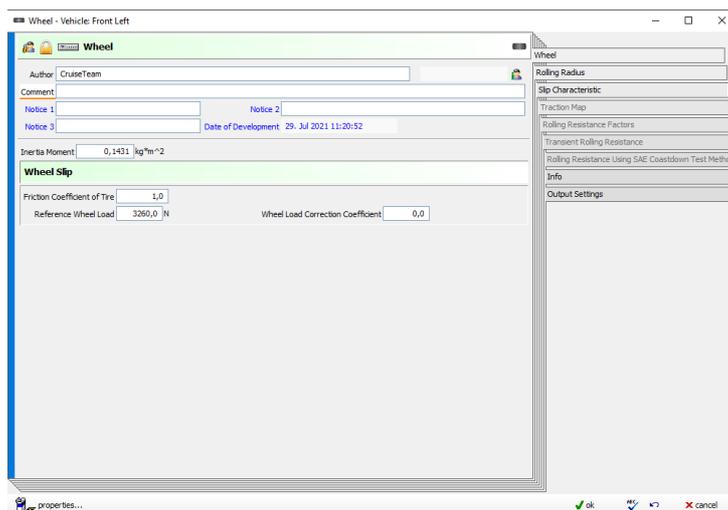


Figura 111 – Janela da aba *Wheel* do módulo da roda.

Na aba *Rolling Radius* procede-se à alteração dos valores referentes aos parâmetros *Static Rolling Radius* e *Dynamic Rolling Radius*, nos quais é apresentado o valor da circunferência de rolamento, C_R . O raio de rolamento estático, para os pneus considerados é obtido a partir de um excerto dos valores referentes aos pneus da série radial 65, tamanhos, dimensões novas e de uso, jantes autorizadas e de capacidade de carga [132]:

Tabela 54 – Valores referentes aos pneus, tamanhos, dimensões novas e de uso, jantes autorizadas e de capacidade de carga, da série radial 65 [132].

Tyre size	Dimensions of new tyre			Manufacturer's measurements						
	Measuring rim	Width of cross-section	Outer diameter	Permissible rims according to DIN 7817 and DIN 7824	Max. width	Max. outer diameter ^d	Static radius ±2.0%	Circumference +1.5% -2.5%	Load index (L _i)	Wheel load capacity ^e
155/65 R 13	4.50 B x 13	157	532	4.00 B x 13 ¹ 4.50 B x 13 ¹ 5.00 B x 13 ¹ 5.50 B x 13 ¹	158 164 169 174	540	244	1625	73	365
155/65 R 14	4½ J x 14	157	558	4 J x 14 ² 4½ J x 14 ² 5 J x 14 ² 5½ J x 14 ²	158 164 169 174	566	257	1700	74	375
165/65 R 13	5.00 B x 13	170	544	4.50 B x 13 ¹ 5.00 B x 13 ¹ 5.50 B x 13 ¹ 6.00 B x 13 ^{1,3}	171 176 182 187	533	248	1660	76	400
165/65 R 14	5 J x 14	170	570	4½ J x 14 ² 5 J x 14 ² 5½ J x 14 ² 6 J x 14	171 176 182 187	579	261	1740	78	425
175/65 R 13	5.00 B x 13	177	558	5.00 B x 13 ¹ 5.50 B x 13 ¹ 6.00 B x 13 ^{1,3}	184 189 194	567	254	1700	80	450

A partir da Tabela 54, verifica-se que para o pneu selecionado, o valor da circunferência de rolamento para o raio de rolamento estático é de 1 740 mm. O valor do raio será obtido a partir da seguinte relação:

$$1\ 740 = 2 \times \pi \times r$$

$$r = \frac{1\ 740}{2 \times \pi} = 276,93\ mm$$

Para obter o valor da circunferência de rolamento para o raio de rolamento dinâmico, é usada a seguinte expressão [132]:

$$C_{R,dyn} = C_R \times (1 + 0,01 \times k_v) \quad (33)$$

Em que:

- $C_{R,dyn}$ a circunferência de rolamento dinâmico (mm);
- C_R é a circunferência de rolamento (mm);
- k_v é a dependência da velocidade da circunferência de rolamento de pneus radiais de veículos de passageiros, acima de 60 km/h (%).

O valor de C_R já foi obtido acima (1 740 mm). O valor de k_v é obtido a partir dos valores apresentados na Tabela 55.

Tabela 55 – Dependência da velocidade da circunferência de rolamento de pneus radiais de veículos de passageiros acima de 60 km/h [142].

V (km h ⁻¹)	60	90	120	150	180	210	240
Factor k_v (%)		+0.1	+0.2	+0.4	+0.7	+1.1	+1.6
Deviation Δk_v (%)		±0.1	±0.2	±0.4	±0.7	±1.1	±1.6

Como velocidade, foi considerado o valor máximo declarado pela marca, de 160 km/h. Uma vez que este valor não se encontra presente na tabela acima, é necessário fazer uma interpolação.

$$k_{v150} = 0,4\% \text{ e } k_{v180} = 0,7\%$$

v	k_v
150	0,4
160	x
180	0,7

$$\frac{160 - 150}{180 - 150} = \frac{x - 0,4}{0,7 - 0,4}$$

$$k_{v160} = 0,1 + 0,4 = 0,5$$

$$k_{v160} = 0,005\%$$

Com todos os parâmetros obtidos, é possível calcular o valor de $C_{R,dyn}$:

$$C_{R,dyn} = 1\,740 \times (1 + 0,01 \times 0,005)$$

$$C_{R,dyn} = 1\,740,09 \text{ mm}$$

O valor do raio será obtido a partir da seguinte relação:

$$1\,740,09 = 2 \times \pi \times r$$

$$r = \frac{1\,740,09}{2 \times \pi} = 276,944 \text{ mm}$$

Na **Figura 112** apresenta-se a janela referente à aba *Rolling Radius* com os valores calculados anteriormente:

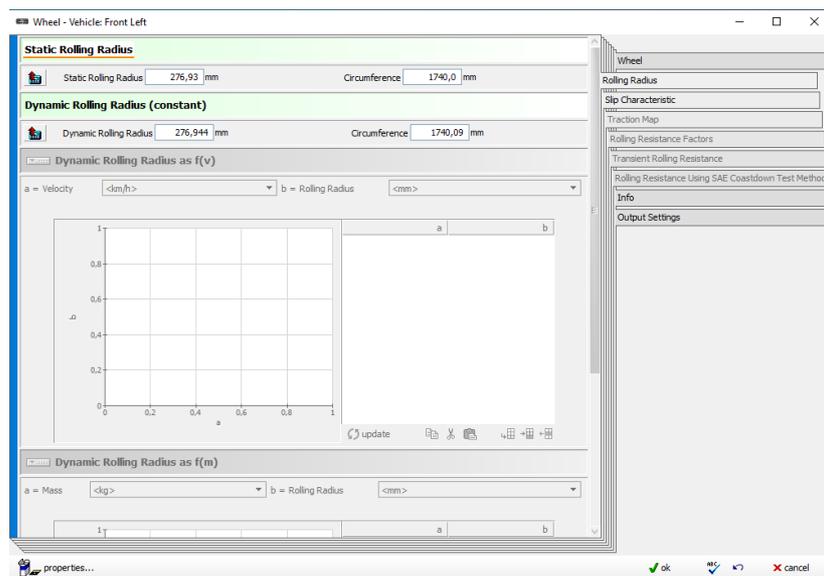


Figura 112 – Janela da aba *Rolling Radius* do módulo da roda.

M6. Módulo *Brake*

O módulo referente aos travões é descrito pelos dados e dimensões relativos aos mesmos. É possível definir travões de tambor, bem como travões de disco.

É possível definir os seguintes parâmetros [69]:

- Superfície do pistão do travão;
- Coeficiente de fricção;
- Fator específico do travão;
- Raio de atrito efetivo;
- Eficiência;
- Momento de inércia.

A superfície do pistão do travão consiste na área do cilindro do travão, que nada mais é do que a área do cilindro hidráulico que multiplicada pela pressão do travão e a eficiência, permite obter a força axial do travão.

O coeficiente de fricção relaciona-se com o coeficiente entre está o tambor do travão, respetivamente o disco de atrito e as sapatas do travão.

O fator específico do travão divide-se em:

- Travão de disco, se $C_B = 1$
- Travão de tambor, se $C_B > 1$

Este fator depende do desenho do travão.

O raio de atrito efetivo é o raio onde a força de travagem é aplicada.

A eficiência considera os efeitos da conversão da parte hidráulica na parte mecânica do travão [70].

Na edição dos módulos referentes a cada disco do travão (dianteiro/traseiro) foram considerados alguns valores-padrão predefinidos.

Selecionado o módulo é apresentada a aba *Brake* são mantidos os valores dos parâmetros predefinidos (Figura 113).

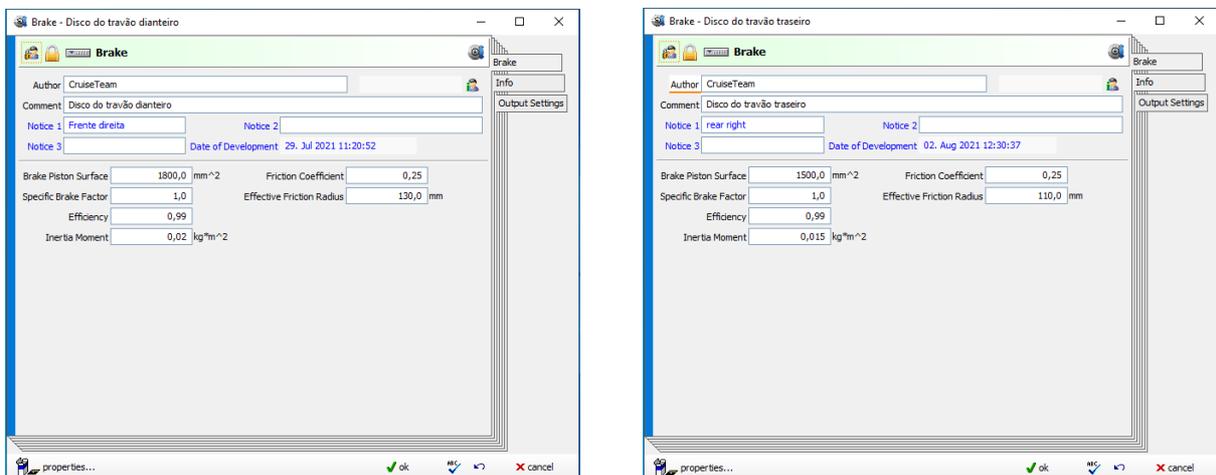


Figura 113 – Janela da aba *Brake* do módulo do travão dianteiro (à esquerda) e traseiro (à direita).

M7. Módulo *Differential*

O módulo do diferencial compensa as discrepâncias nas respetivas taxas de rotação das rodas motrizes. Com raras exceções para aplicações especiais, o diferencial é uma unidade de acionamento de engrenagem cônica. Quando as engrenagens cônicas de saída nos lados esquerdo e direito

(disposição mais comum) são de dimensões iguais, as engrenagens diferenciais atuam como um braço de equilíbrio para equalizar a distribuição de binário para as rodas esquerda e direita.

No diferencial é possível definir um fator de divisão de binário, no caso do diferencial ser aplicado na tração às quatro rodas, ou seja, se existir mais binário a ser transferido para o eixo dianteiro ou traseiro, o que permite preservar a qualidade de condução nos veículos com tração apenas em duas rodas [69].

O módulo referente ao diferencial foi mantido, com a manutenção dos valores-padrão predefinidos (Figura 114).

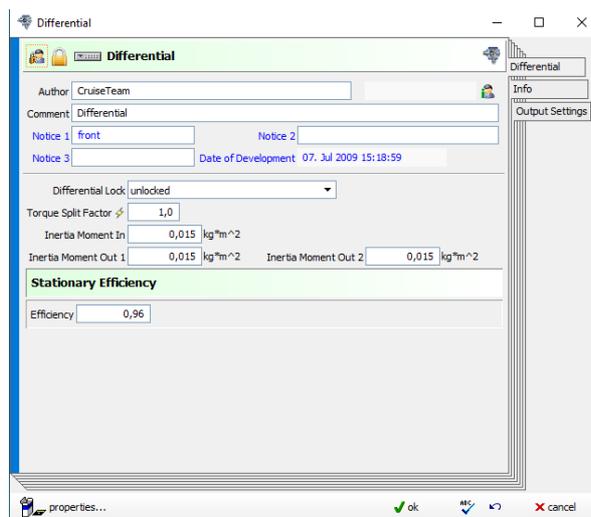


Figura 114 – Janela da aba *Differential* do módulo do diferencial.

M8. Módulo *Single Ratio Transmission*

A transmissão de relação única é um andar de engrenagem com relação fixa. Pode ser utilizado como passo de transmissão do diferencial (unidade de transmissão final). O binário de arranque é transferido para um binário de acionamento da potência do andar de transmissão, considerando a transmissão, os momentos de inércia de massa e o momento de perda [69].

No módulo referente à transmissão mantiveram-se os parâmetros predefinidos no modelo que serviu de base, conforme ilustrado na Figura 115:

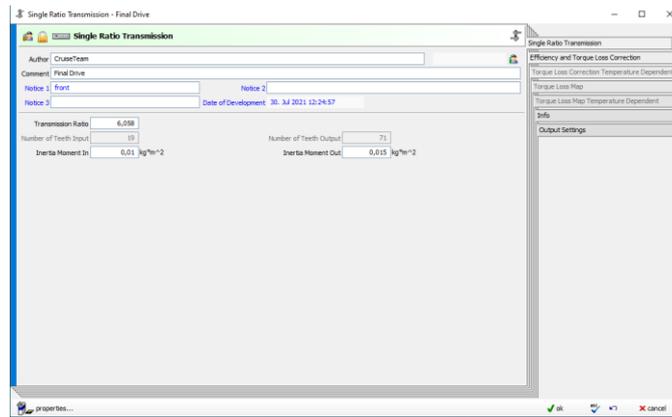


Figura 115 – Janela da aba *Single Ratio Transmission* do módulo da transmissão.

M9. Módulo *Cockpit* do AVL Cruise

O *cockpit* liga o condutor ao veículo. Neste componente, as conexões são feitas somente através do barramento de dados. Por um lado, o condutor obtém informações como a velocidade do veículo e a aceleração do veículo. Por outro lado, as informações do condutor, como as posições dos pedais, são entregues a outros componentes. As posições do pedal (como o pedal de embraiagem) são transferidas para os indicadores correspondentes (ponto de embraiagem), a partir das características do pedal, tais como a posição do mesmo [69].

No módulo relativo ao cockpit, foram considerados os parâmetros que se encontravam predefinidos na aba *Cockpit* (Figura 116), *Acceleration Pedal Characteristic* (Figura 117) e *Brake Pedal Characteristic* (Figura 118):

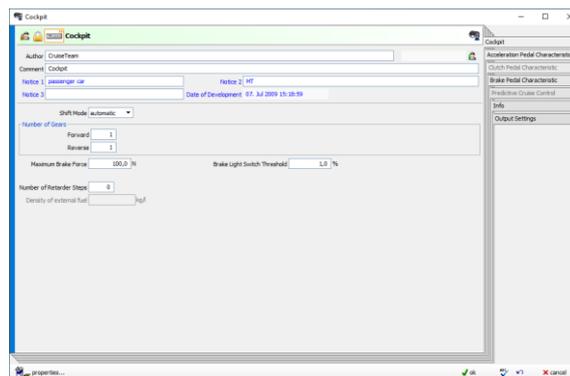


Figura 116 – Janela da aba *Cockpit* do módulo do *cockpit*.

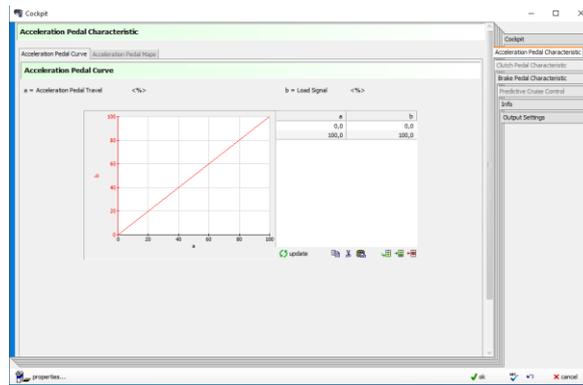


Figura 117 – Janela da aba *Acceleration Pedal Characteristic* do módulo do *cockpit*.

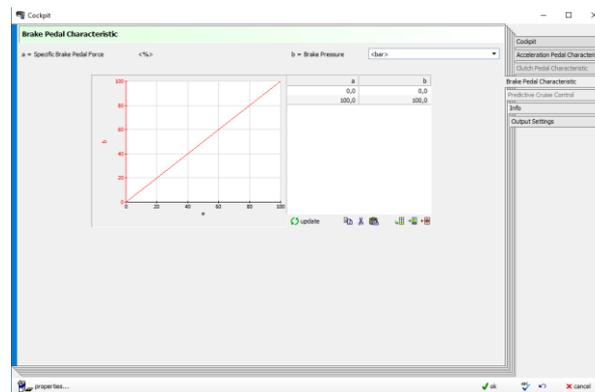


Figura 118 – Janela da aba *Brake Pedal Characteristic* do módulo do *cockpit*.

M10. Módulo *Online Monitor*

O monitor *online* pode ser introduzido se a execução do cálculo for detetada. É possível mostrar alguns resultados do cálculo, em simultâneo com a execução do cálculo.

A ordem das conexões do número do canal decide quais os sinais que serão exibidos no módulo *Online Monitor*. No caso de múltiplas conexões de barramento de dados para a mesma quantidade, será exibido o canal de barramento de dados com o número de canal mais alto [69].

No módulo relativo ao monitor *online*, apresentam-se na **Figura 119** os parâmetros relativos ao barramento de dados:

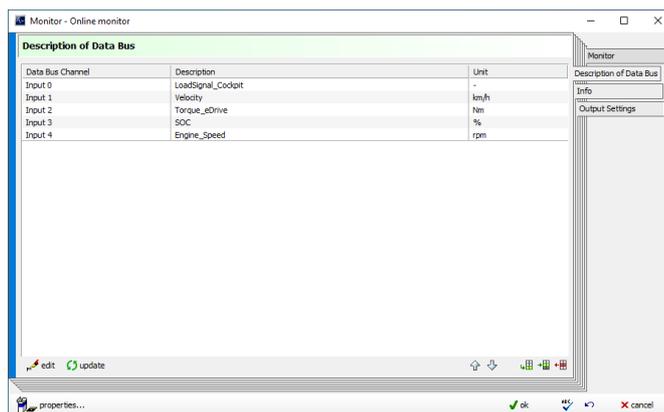


Figura 119 – Janela da aba *Description of Data Bus* do módulo *Online Monitor*.

M11. Controlador *On-board*

Dentro da caixa referente ao controlador *on-board*, existem três módulos, nomeadamente:

- Constantes;
- Controlo PID;
- Funções.

No módulo *Constants*, o usuário pode definir até 99 valores constantes, os quais podem ser utilizados por outros componentes através do barramento de dados. Os valores podem ser do tipo *integer*, *double* ou *string*.

Cada constante requer a definição do número do canal do barramento de dados, uma designação, o valor da constante, a unidade e o tipo de dado. O tipo de dados pode ser inteiro, duplo ou *string* [67].

Na **Figura 120** apresentam-se os parâmetros relativos às constantes consideradas:

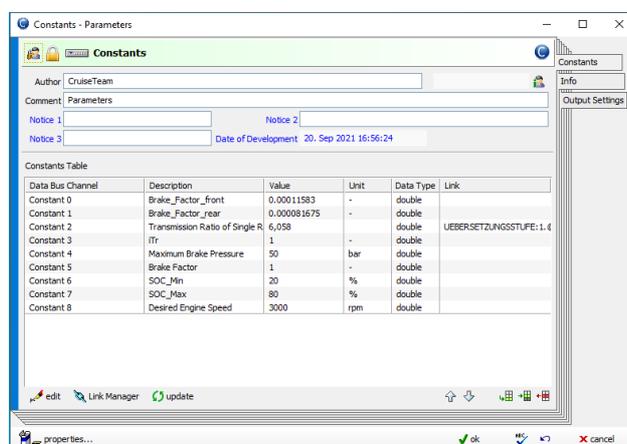


Figura 120 – Janela da aba *Constants* do módulo *Constants*.

No que respeita ao controlo PID (*Proportional-Integral-Derivative*), pode ser combinado com outros

componentes de processamento de sinal (por exemplo, componente de função).

O primeiro modo é o modo " *Standard PID Control*", em que é usada a diferença entre um valor desejado e um valor real para gerar um valor de saída.

O segundo modo é o modo " *Advanced Signal Control with Limitation*", onde uma entrada adicional " *Control Value*" (normalmente o sinal " *Desired Clutch Release*" do módulo *Cockpit*) é considerada e adicionada ao valor de saída, com este a pode ser usado para limitar o valor real do lado inferior (como, por exemplo, o sinal de carga da roda) ou do lado superior (como, por exemplo, a aceleração do veículo). É importante que o "Valor de Controle" tenha um limite "natural" de zero, como é o caso do " *Desired Clutch Release*" [69].

Abaixo ilustra-se a janela com os parâmetros do controlador PID referente ao motor de combustão:

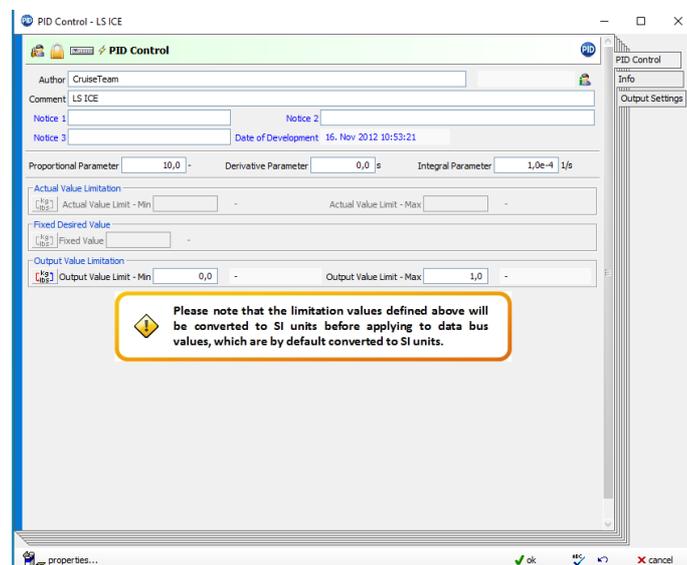


Figura 121 – Janela da aba *PID Control* do módulo *PID*.

O módulo *Function* pode ser usado para cálculos a partir de funções definidas pelo utilizador, com 99 valores de entrada a poderem ser lidos através do barramento de dados. Os valores são os argumentos da função, juntamente com até 10 constantes definidas pelo usuário. Esses argumentos devem ser conectados para formar o termo da função, através de operadores que podem ser selecionados num menu de seleção [69].

De seguida apresenta-se o Código C dos travões:

```

/*Conversion routine*/
/*Converting brake Torque into Pressure for all Brakes (Front & Rear)*/

double eBrake;
/* Check whether Torque of eDrive is negative that means the load signal to the E-Motor is negative.
In this case the corresponding brake Pressure will be calculated*/

if (a[0] < 0 )
{

/*
The corresponding Brake pressure will be determined by using the following equation:
 $M = 2 * P * A * \text{eff} * u * r * c$ 
with
M: Brake Torque
P: Brake Pressure
A: Brake Piston Surface
eff: Efficiency
u: Friction Coefficient
r: effective Friction Radius
c: Specific Brake factor
 $P = M / (2 * A * \text{eff} * u * r * c)$ 
We simplify the formula for Rear Brake and Front Brake by using Brake_Factor_Front and Brake_Factor_Rear in order to use the mean value of both:
Brake_Factor_Front=  $A * \text{eff} * u * r * c$ 
Brake_Factor_Rear=  $A * \text{eff} * u * r * c$ 
We have also to take into account the following ratios: Ratio of Final Drive (IFD) and Ratio of Transmission (ITR) between the eDrive and Brake.
[P.S. The ratio ITR is equal 1 because there isn't any Gearbox in the model.]

 $P = M * \text{IFD} * \text{ITR} / (2 * (\text{Brake\_Factor\_Front} + \text{Brake\_Factor\_Rear}) / 2)$ 

The used channel data are then :
a[0] : eDrive_Torque
a[1] : IFD
a[2] : ITR
a[3] : Brake_Factor_Front
a[4] : Brake_Factor_Rear

*/

eBrake = a[0]*2*a[1]*a[2]/(2*(a[3]+a[4]));
}
else
{
/* and if the Torque is positive that means E-motor drives the vehicle the Brake should be equal ZERO */

eBrake = 0.;
}
/*Calculation of reduced mechanical Brake

Function to determine a maximum value
By applying negative load the eDrive applies a resistance which generates electrical power. In this case the mechanical power required for breaking will be reduced by
the power which the E-Motor has recuperated.
That means the vehicle will at first be electrically braked and The rest required brake energie will be provided by mechanical brakes
*/

if ((eBrake+a[5])>0.0)
{
y[0] = (eBrake+a[5]);
}
else
{
y[0] = 0.0;
}
}

```

Figura 122 – Código C dos travões.

No módulo *Function*, apresentam-se na **Figura 123** os parâmetros relativos ao barramento de dados referentes aos travões:

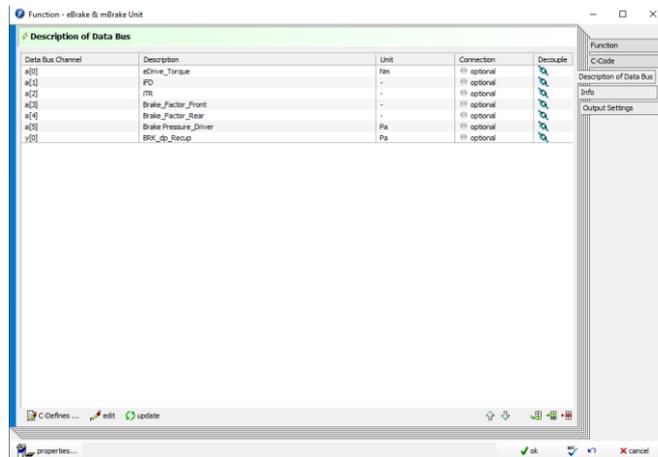


Figura 123 – Janela da aba *Description of Data Bus* do módulo *Function*, relativo aos travões.

Abaixo encontra-se o Código C relativo ao sistema de controlo do *cockpit*.

```

/* Transition from edriving to ebraking*/

/*Checking whether the DRIVER applies the Brake pedal. This information can be directly taken from COCKPIT:
if the Brake Pressure is greater than ZERO then there is a braking action. additionally the vehicle should still be on the move
*/
if (a[3] > 0 && a[0] > 0.1)
{
/*In this case the Brake pressure should be converted into Ratio of the maximum Brake Pressure. Additionally a brake Factor can be also used to scale this ratio
according to the size of E-Motor in order to get suitable load to the eDrive.
required channel data are then:

a[0] : Vehicle Velocity
a[1] : Vehicle Acceleration
a[2] : Load Signal
a[3] : Brake Pressure
a[4] : Maximum Brake Pressure
a[5]:Brake factor
*/
    y[0] = a[3]/a[4]*(-1)*a[5];
}
else
{

/*If there isn't any brake action (Brake Pressure is equal ZERO) then the load from COCKPIT is used as drive load */

    y[0] = a[2];
}

```

Figura 124 – Código C da unidade de controlo do *cockpit*.

No módulo *Function*, apresentam-se na **Figura 125** os parâmetros relativos ao barramento de dados referentes ao *cockpit*.

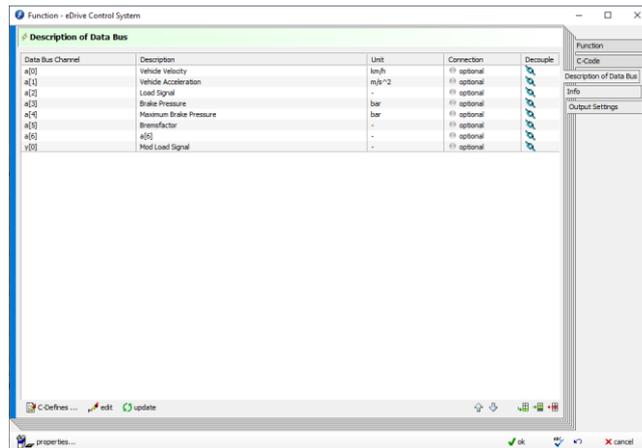


Figura 125 – Janela da aba *Description of Data Bus* do módulo *Function*, relativo ao *cockpit*.

Por fim apresenta-se o Código C relativo ao *range extender*.

```

/* Starting && Shut down Engine and Charging Battery*/
int operatingMode;

if(realTime<=0.0) { operatingMode = 0; }

/*Checking whether the State of Charge exceeds the Minimum Value*/
if (a[0] < a[1])
{
/*
Range extending:
In this case the Engine should be started and Generator have to generate energy into Battery.
*/
operatingMode=1;
}
if (a[0] > a[2] )
{
/*
Pure electrical Drive:
In this case the Engine is turned off and the E-Motor perform the eDriving.
*/
operatingMode=0;
}
if (operatingMode)
{
/*
Start Switch for Engine have to be set.
The load signal for Generator should be applied when the engine is around its optimum operating area (in this case constant operating speed is set).
The load signal to the ENGINE is provided by PID which controls the Engine speed to the pre-defined speed level.
*/

y[0] = 1; /*start switch Gen*/
y[1] = 0; /*load signal Gen int*/
if (a[4]> (a[6]-50)) /*check on the ICE speed*/
{
y[1] = -0.9; /*load signal Gen*/
}

y[2] = a[3]; /*start switch ICE*/
y[3] = a[5]; /*load signal ICE*/
if ( (a[4]< (a[6]-50)) && (a[5]>0.5) ) /*check on the ICE speed and limit the value*/
{
y[3] = 0.9; /*load signal ICE*/
}
}
if (!operatingMode)
{
/*
When ICE is turned off, all of the set values to the Range Extender components are set to not-active.
*/
y[0] = 0.0;
y[1] = 0.0;
y[2] = 0.0;
y[3] = 0.0;
}

```

Figura 126 – Código C do *range extender*.

Na Figura 127 os parâmetros relativos ao barramento de dados referentes ao *cockpit*.

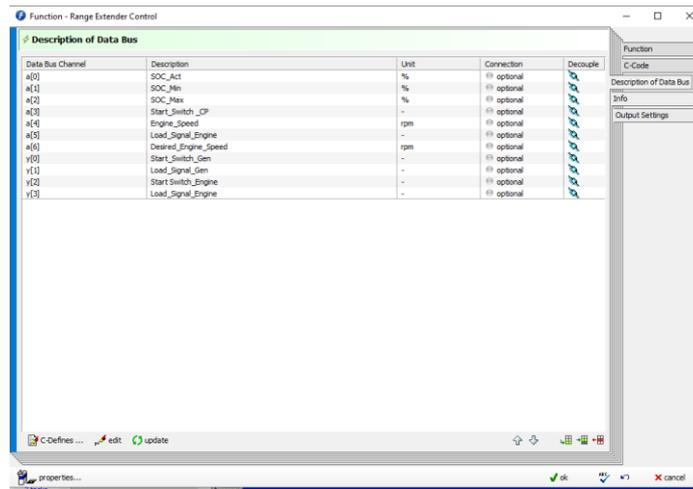


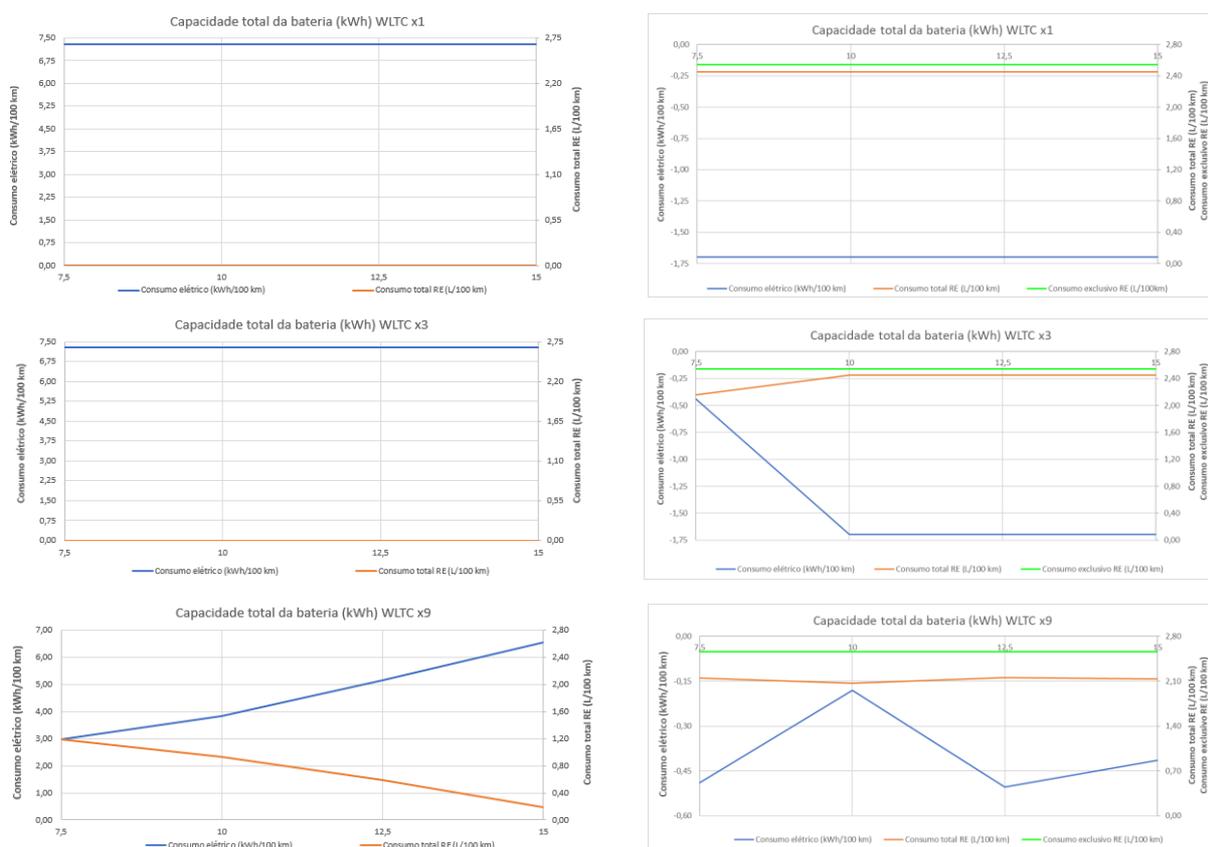
Figura 127 – Janela da aba *Description of Data Bus* do módulo *Function*, relativo ao *cockpit*.

ANEXO N – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM EXCEL

N1. Capacidade total da bateria

Para a análise da capacidade total da bateria foram consideradas capacidades totais da bateria entre 15 e 7,5 kWh com decrementos de 2,5 kWh entre cada ensaio, para um estado de carga inicial de 80% e 20%, uma vez que, quando as baterias de íões de lítio se encontram entre estes valores, o desempenho das mesmas revela-se mais eficiente, associado a uma reduzida capacidade de degradação. Para valores fora desta faixa de SoC, a vida útil da bateria diminui ao longo do tempo, associada a uma dissolução de materiais ativos e fugas térmicas [133]. Segundo FERNANDEZ *et al.* (2013), observa-se que o funcionamento das baterias de íões de lítio fora destes valores leva a uma perda na condutividade. Já LI *et al.* (2001) e WU *et al.* (2015) verificaram que a sobrecarga pode reduzir a potência do lítio e causar danos irreversíveis como, mudança na forma da bateria e explosões.

Na **Figura 128** ilustram-se as variações dos valores relativos aos consumos, autonomia e emissões de CO₂ alcançados:



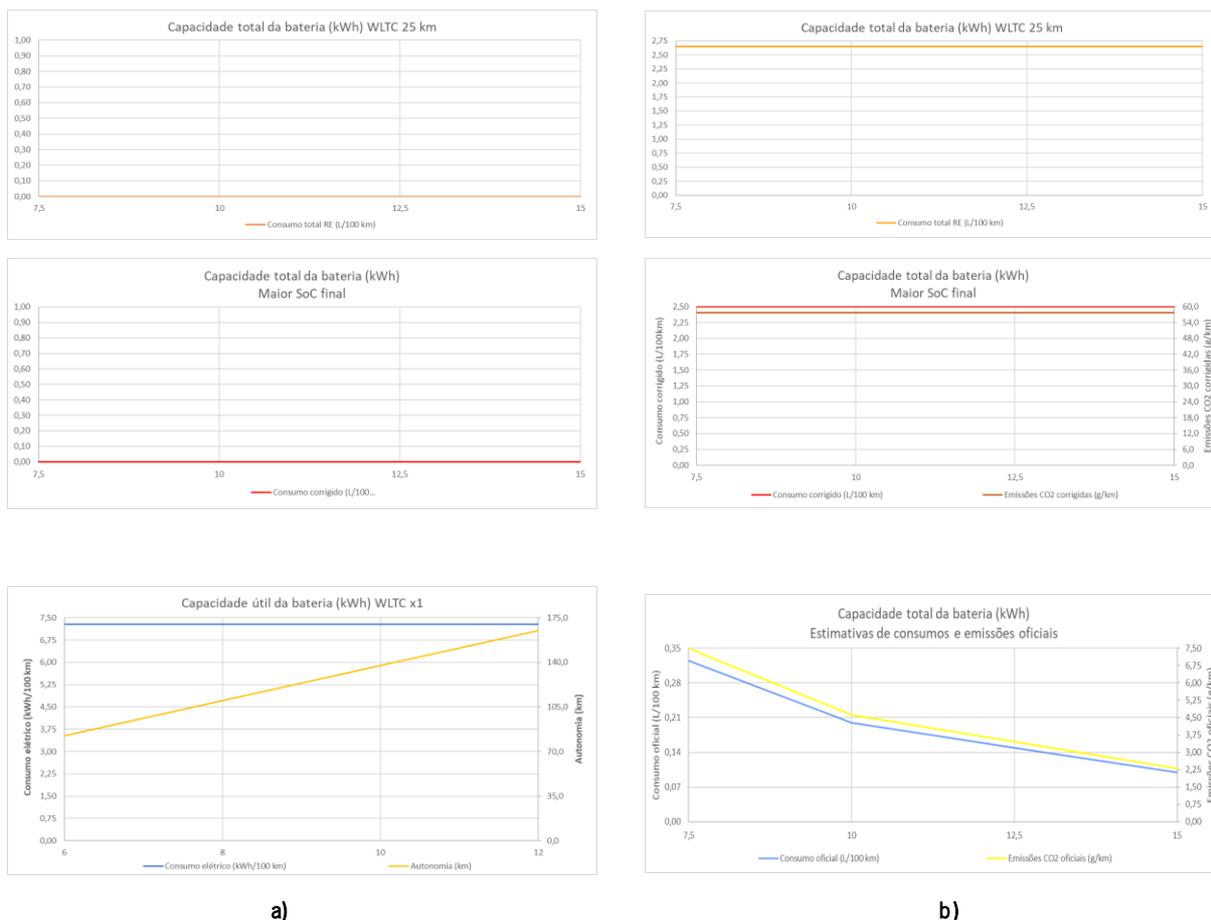


Figura 128 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO₂ nos vários ciclos WLTC nos modos CD e CS relativos à capacidade total da bateria para um SoC: a) 80%, b) 20%.

Os instantes em que ocorreu travagem regenerativa são ilustrados a partir dos valores negativos presentes nos gráficos. Na **Figura 128 a**, as diferenças observadas estão relacionadas com o estado de carga da bateria, que diminui com a diminuição da capacidade total da bateria.

Na **Figura 128 b** são exibidos os resultados para o ciclo de 25 km (modo CS), em que o RE é ativado quando o SoC cai abaixo de 20%. Neste ciclo, pode-se observar que o extensor de autonomia operou durante períodos limitados com uma potência constante correspondente à configuração ECO. O excedente de energia produzida encontra-se representado a verde-escuro como um valor negativo. O SoC oscilou entre 20% e 30%, em que o modo EV é reativado.

N2. Potência máxima da bateria

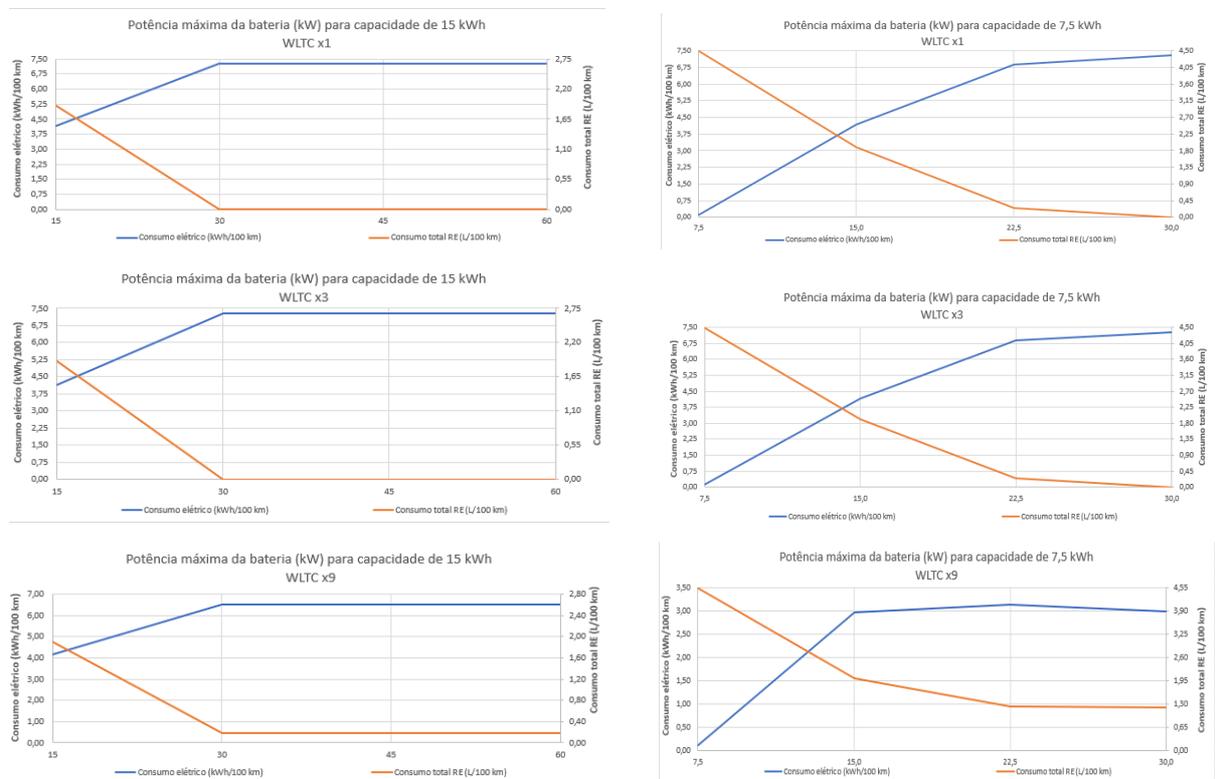
Na definição da potência máxima da bateria considerou-se uma taxa de descarga de 4C, enquanto a potência máxima do motor elétrico foi de 30 kW, dado ser o valor máximo fornecido presente no *kit* escolhido. No ficheiro Excel é possível saber qual a potência do motor elétrico necessária em cada instante, a partir dos dados relativos à energia de propulsão requerida, considerando exclusivamente o

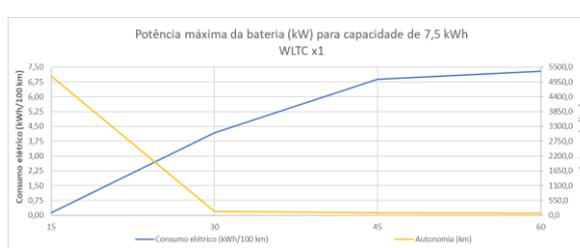
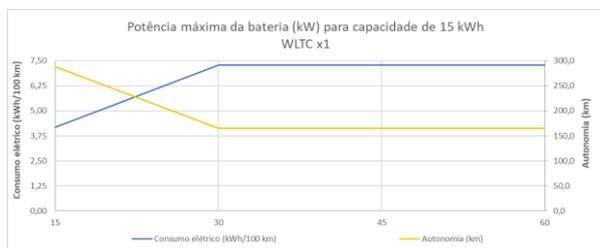
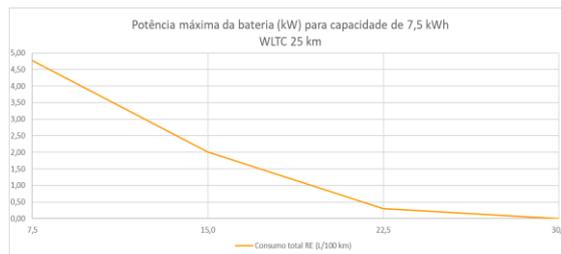
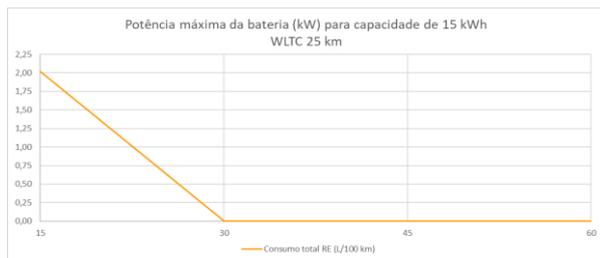
motor elétrico e a eficiência média do motor elétrico. Quando a mencionada energia de propulsão supera a potência máxima do motor elétrico, aparece o número 1 na coluna “*ERROR: Motor Power insufficient to fulfil cycle*”, a indicar que o ciclo WLTC não pode ser concluído, dado a potência do motor elétrico não ser suficiente.

ERRO: Potência do motor insuficiente para completar o ciclo completo	ERRO: Potência do motor insuficiente para completar o ciclo completo	Potência elétrica do motor necessária (kW)
	1	0
	1	0
	1	0
	1	0
	1	0
	1	0
	1	25509

Figura 129 – Coluna referente a potência insuficiente do motor elétrico sem erro (à esquerda), com erro, dado a energia de propulsão ser superior à potência máxima do motor elétrico (ao centro); potência do motor elétrico necessária para cumprir o ciclo, com indicação do valor máximo necessário (à direita).

Na **Figura 130** e **Figura 131** ilustram-se as variações dos valores relativos aos consumos, autonomia e emissões de CO₂ alcançados:

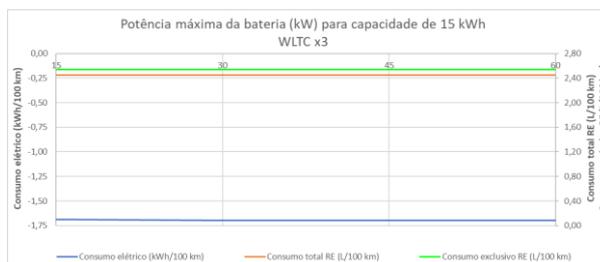




a)

b)

Figura 130 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO₂ nos vários ciclos WLTC para 80% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.



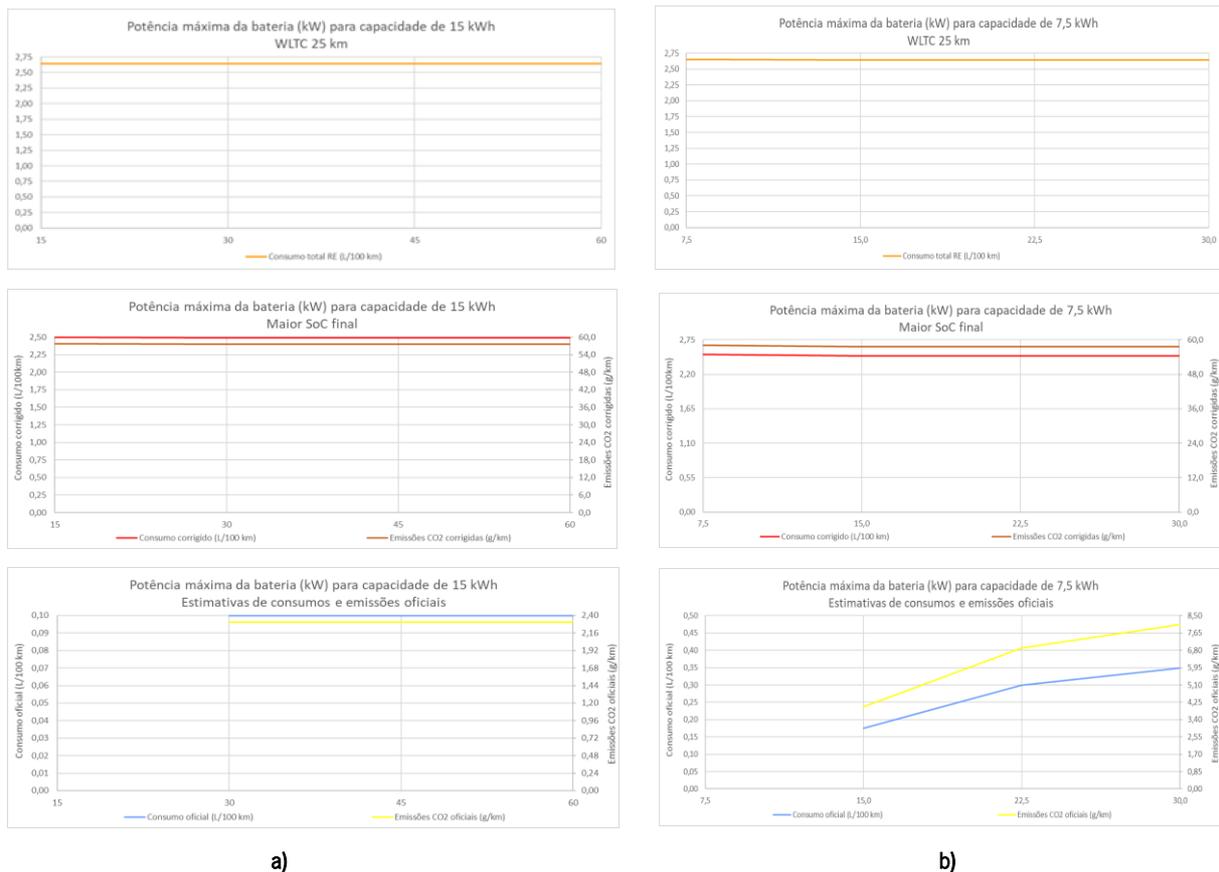
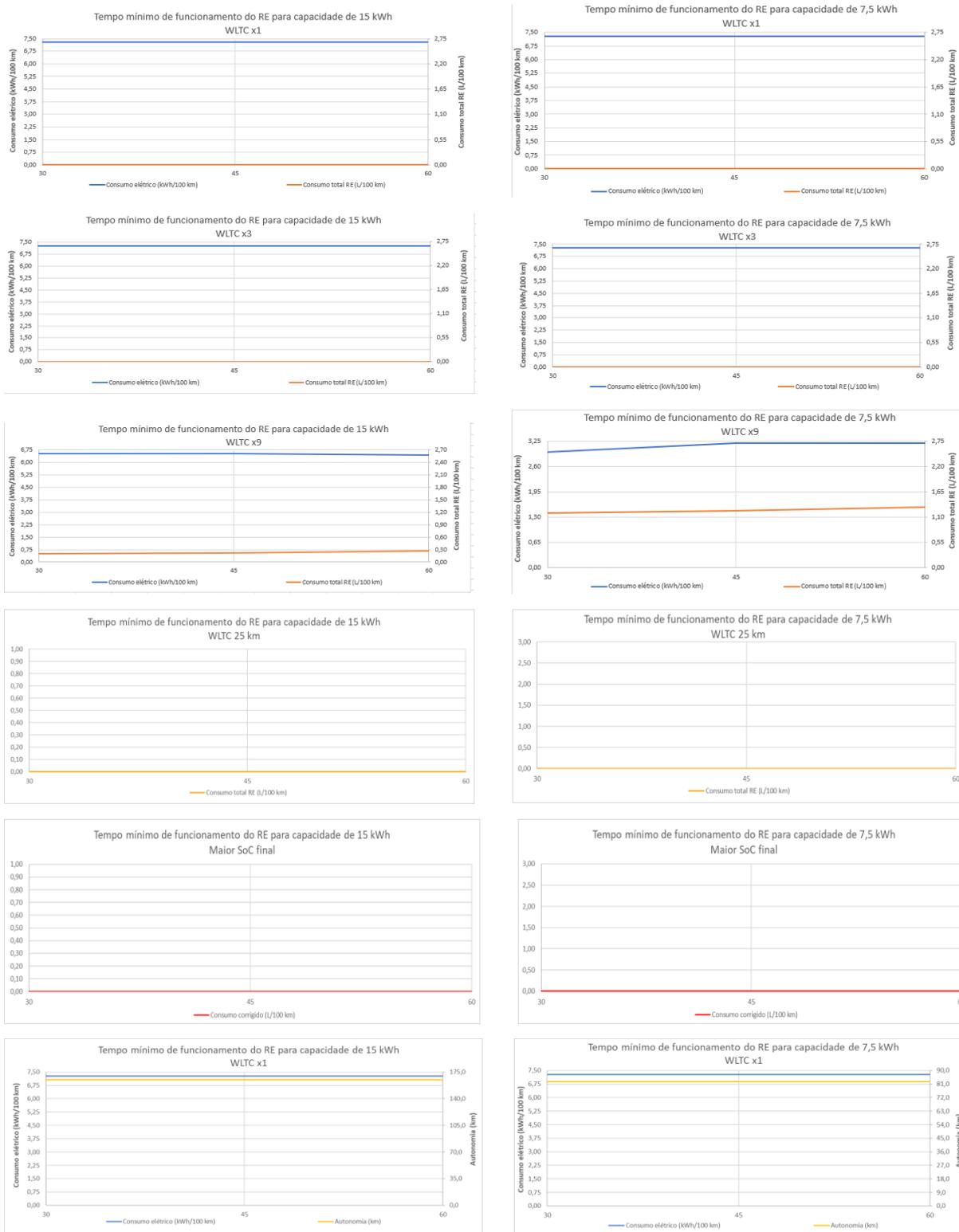


Figura 131 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO₂ nos vários ciclos WLTC para 20% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

N3. Tempo mínimo de funcionamento do *range extender*

Nas simulações referentes ao tempo mínimo de funcionamento do *range extender*, variaram-se apenas as capacidades totais da bateria para 15 e 7,5 kWh, dado serem as capacidades em que ocorrem os valores mínimos e máximos dos consumos elétrico e do RE, com, tal como no parâmetro anterior, o valor máximo para a capacidade considerada no *kit* (10 kW) ter valores máximos semelhantes aos verificados para 15 kW, mantendo-se sempre as potências máximas da bateria correspondentes à taxa de descarga de 4C. Os estados de carga inicial considerados foram de 80% e 20%. Na definição do tempo mínimo de funcionamento do *range extender* foram definidos como parâmetros 30, 45 e 60s.

De seguida mostram-se os gráficos que permitem visualizar a variação dos consumos, autonomia e emissões de CO₂ ao alterar tanto a capacidade total da bateria como o tempo mínimo de funcionamento do *range extender*.



a)

b)

Figura 132 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO₂ nos vários ciclos WLTC correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do range extender para 80% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

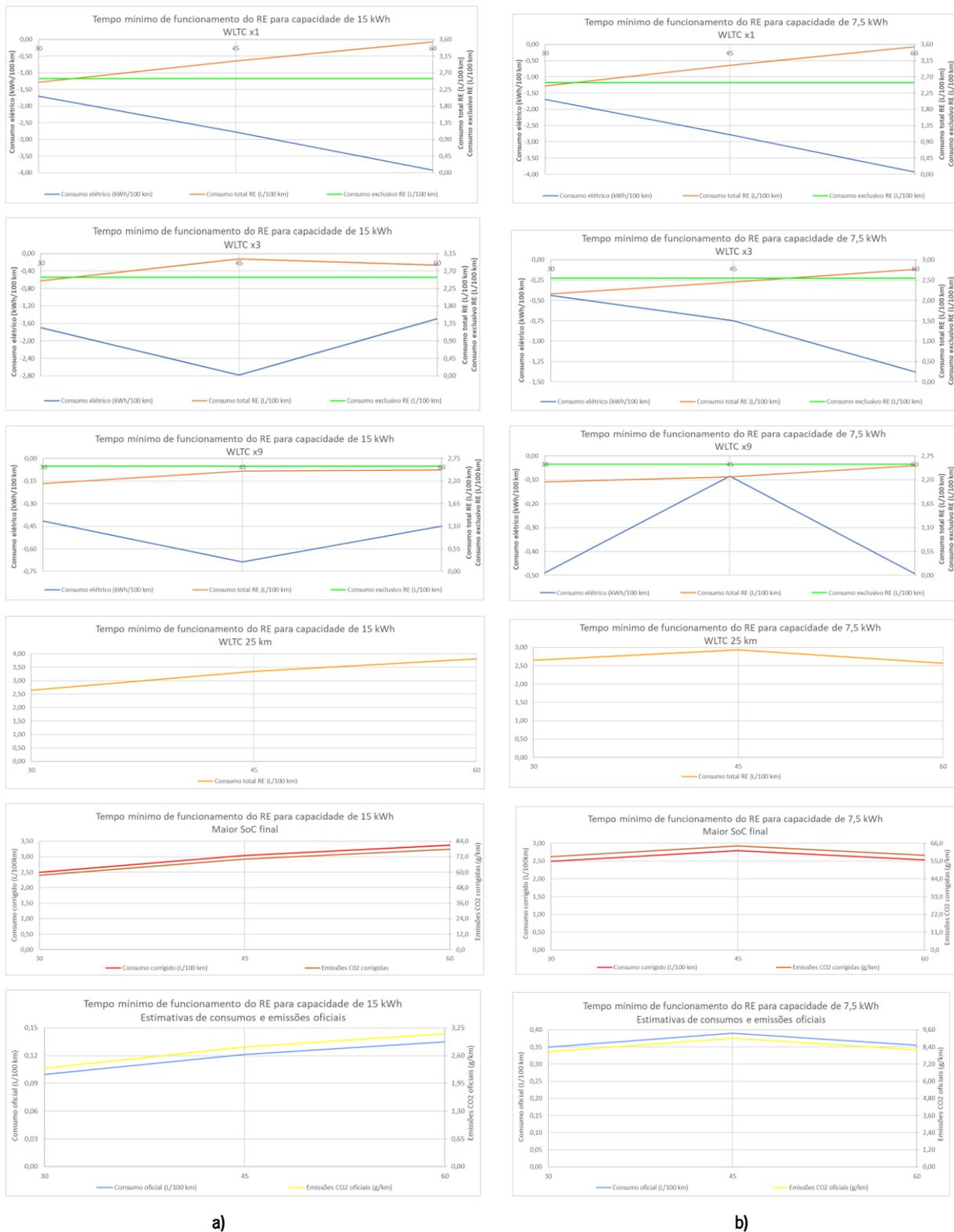
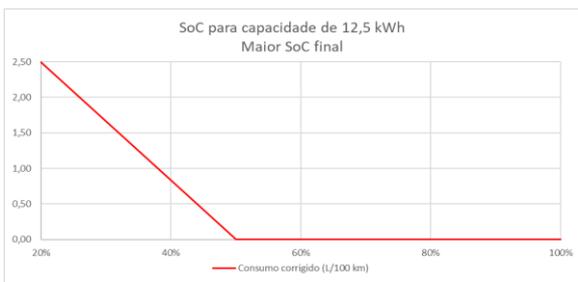
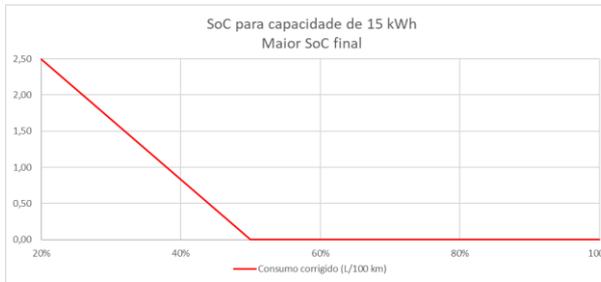
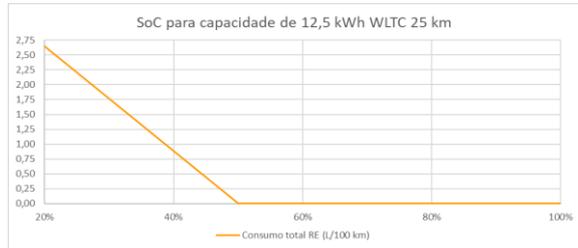
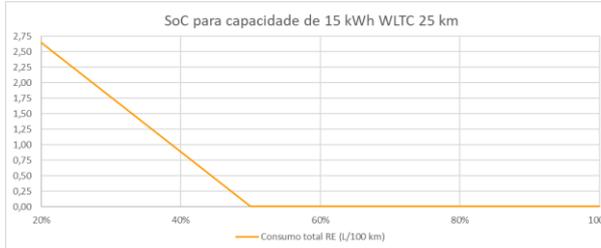
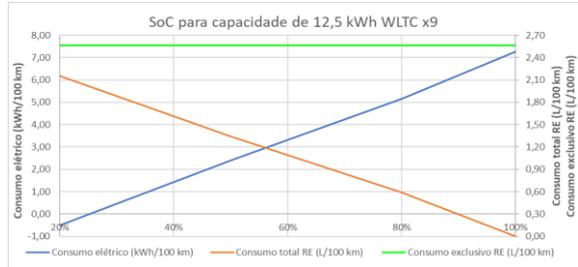
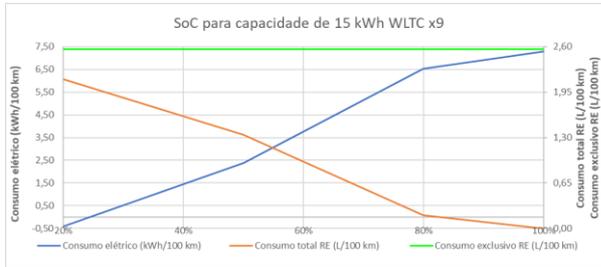
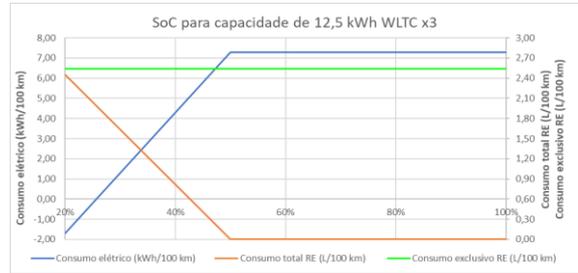
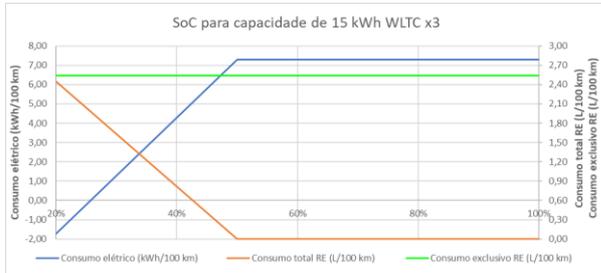
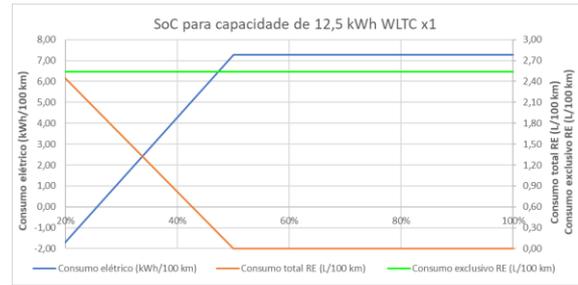
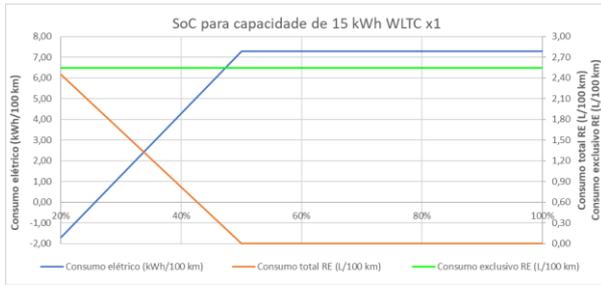


Figura 133 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO2 nos vários ciclos WLTC correspondentes ao tempo mínimo de funcionamento do range extender para 20% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

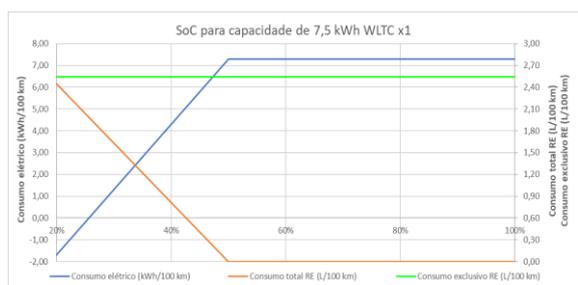
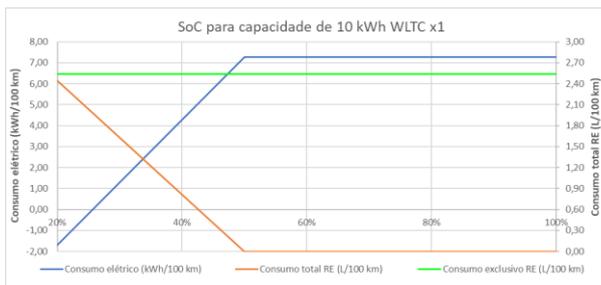
N4. Estado de carga da bateria (SoC)

Na **Figura 134** é possível ver a tendência dos consumos, com a diminuição do estado de carga e da capacidade total da bateria:



a)

b)



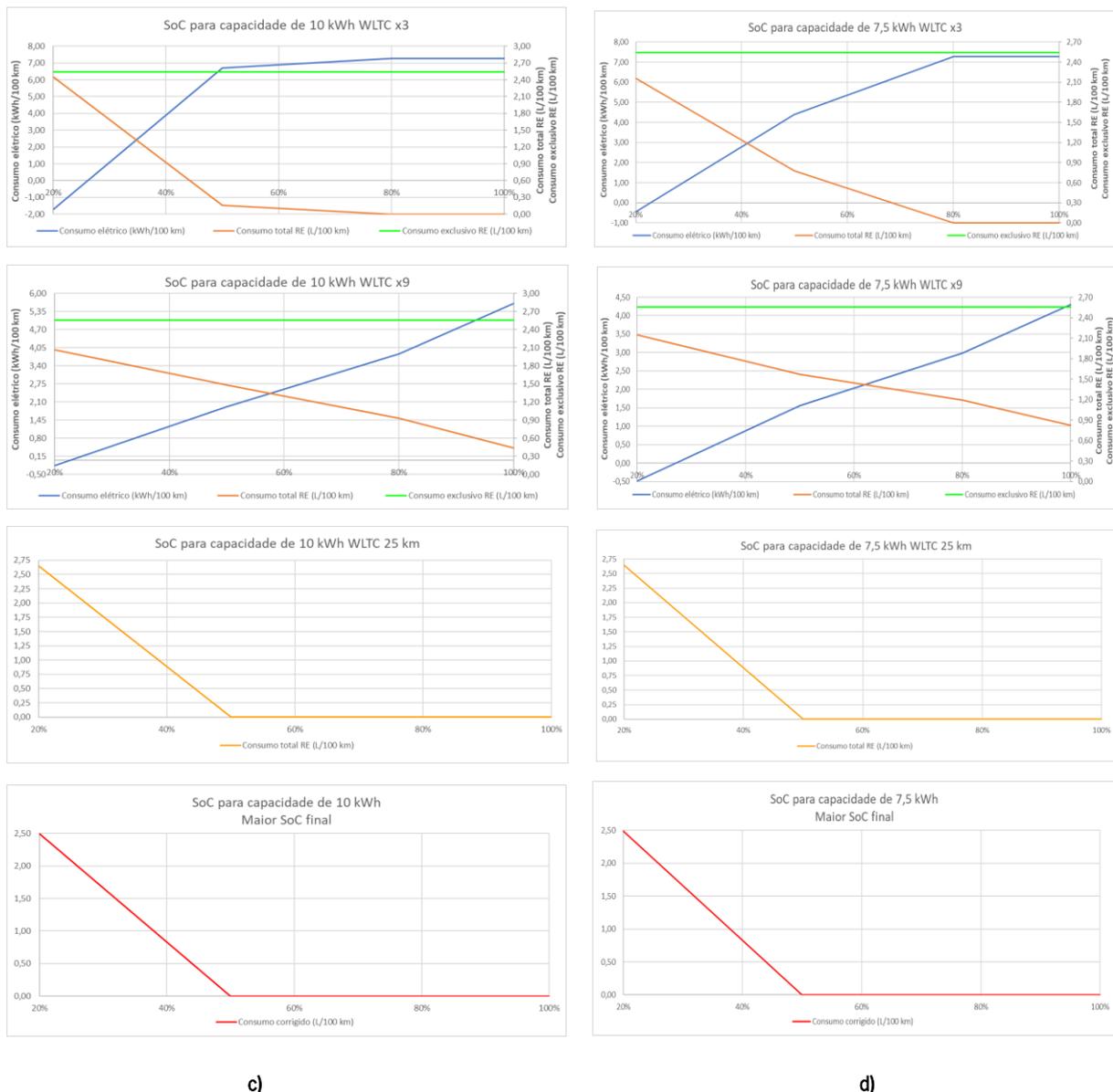
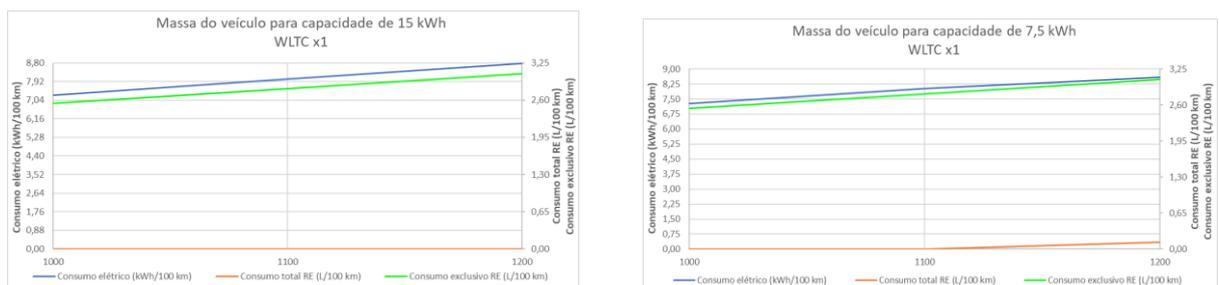


Figura 134 – Variação dos consumos nos vários ciclos WLTC correspondentes ao estado de carga (SoC) relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 12,5 kWh, c) 10 kWh e d) 7,5 kWh.

N5. Massa do veículo

Na **Figura 135** e **Figura 136** ilustram-se as variações dos valores relativos aos consumos, autonomia e emissões de CO₂ alcançados:



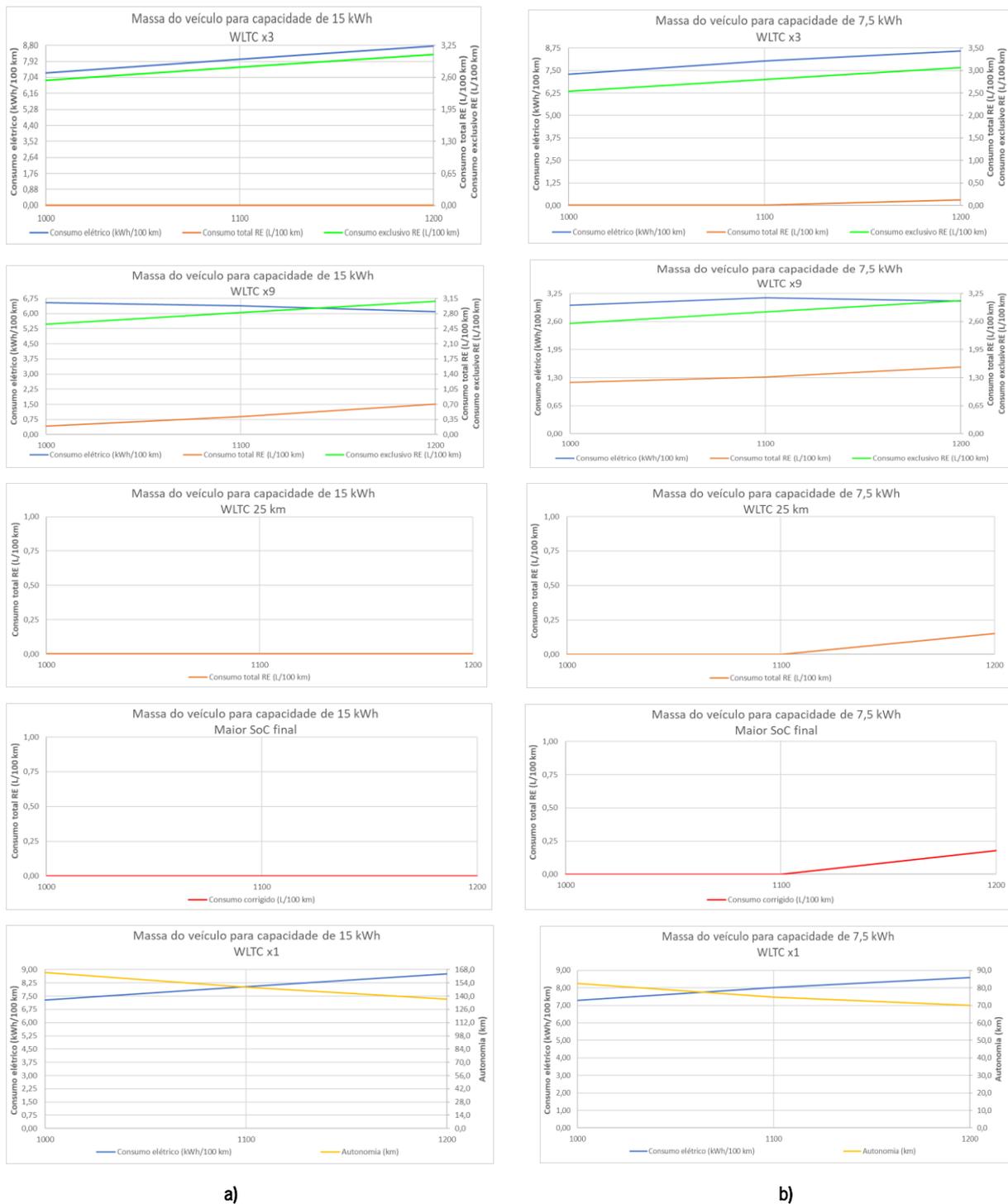
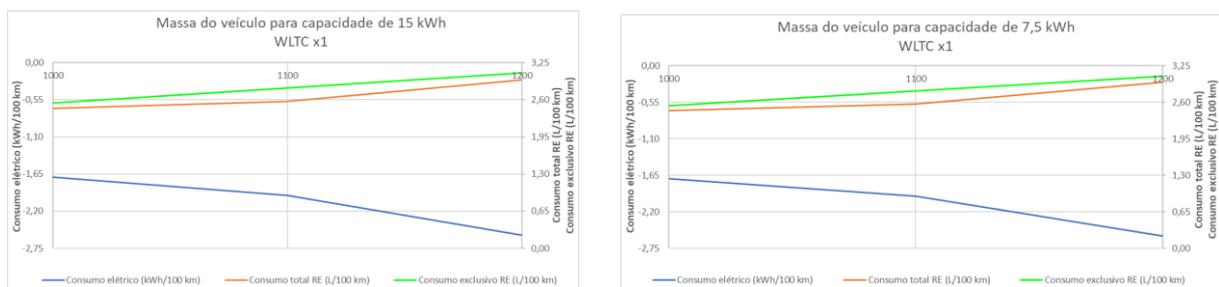
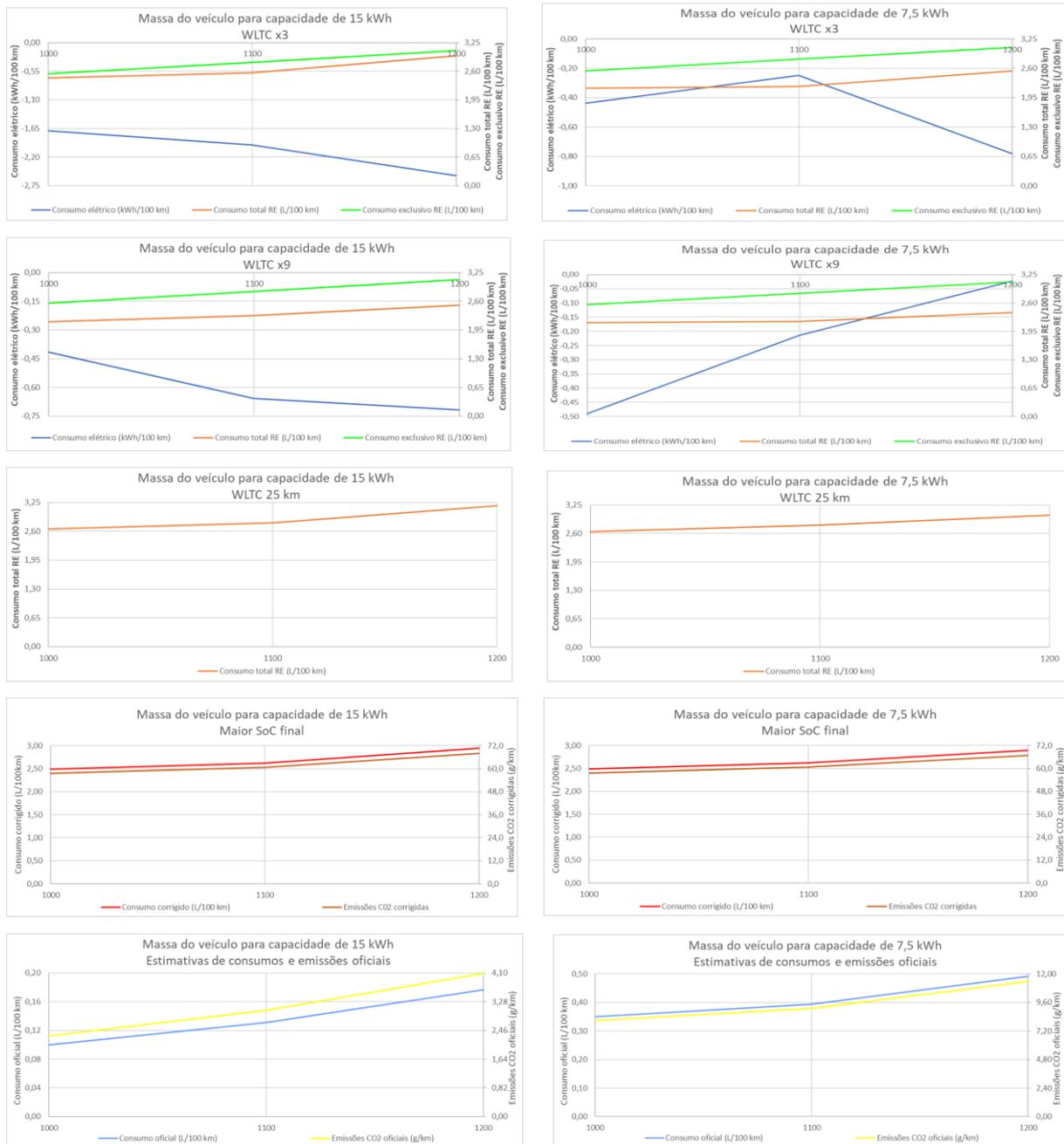


Figura 135 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO₂ nos vários ciclos WLTC correspondentes à massa do veículo para 80% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.





a)

b)

Figura 136 – Variação dos consumos, autonomia e emissões de CO2 nos vários ciclos WLTC correspondentes à massa do veículo para 20% de SoC relativos à capacidade total da bateria de: a) 15 kWh, b) 7,5 kWh.

ANEXO O – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO AVL CRUISE

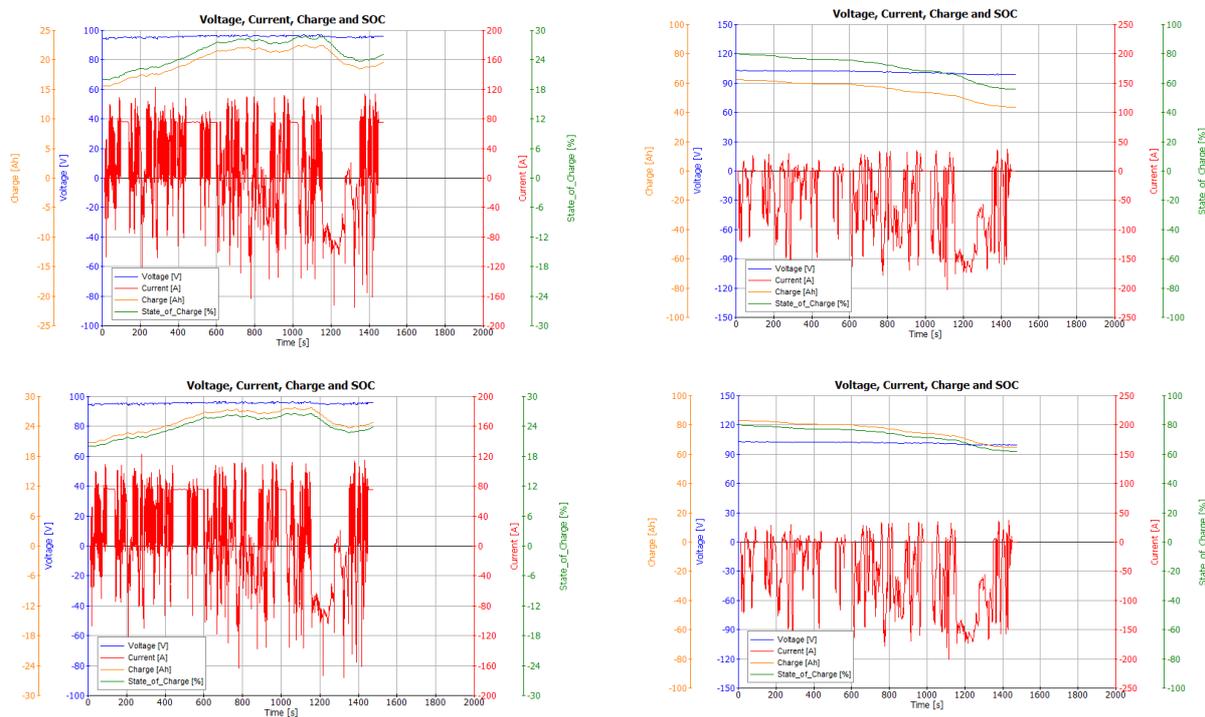
01. Capacidade total da bateria

Ao longo deste subcapítulo, à exceção do gráfico relativo ao SoC, apenas serão ilustrados os resultados para a capacidade total da bateria para 7,5 kWh em ambos os estados de carga analisados (20% e 80%), dado que o peso do veículo foi fixado em 1 000 kg, o que significa que o veículo precisou da mesma quantidade de energia durante o ciclo WLTC considerado. Como a variável analisada foi a capacidade da bateria, como será visto mais à frente, o SoC inicial e final será diferente.

case	k1	Maximum Charge	k2	Initial Charge	k3	Curb Weight
1	1	7,8125	1	20	1	1000
7	1	7,8125	3	80	1	1000
13	2	10,4165	1	20	1	1000
19	2	10,4165	3	80	1	1000
25	3	13,0205	1	20	1	1000
31	3	13,0205	3	80	1	1000
37	4	15,6245	1	20	1	1000
43	4	15,6245	3	80	1	1000

Figura 137 – Parâmetros de entrada da variável capacidade total da bateria.

Na Figura 138 são apresentados os gráficos referentes à tensão, corrente, capacidade da bateria e estado de carga da bateria (SoC), relativos ao módulo *Battery*:



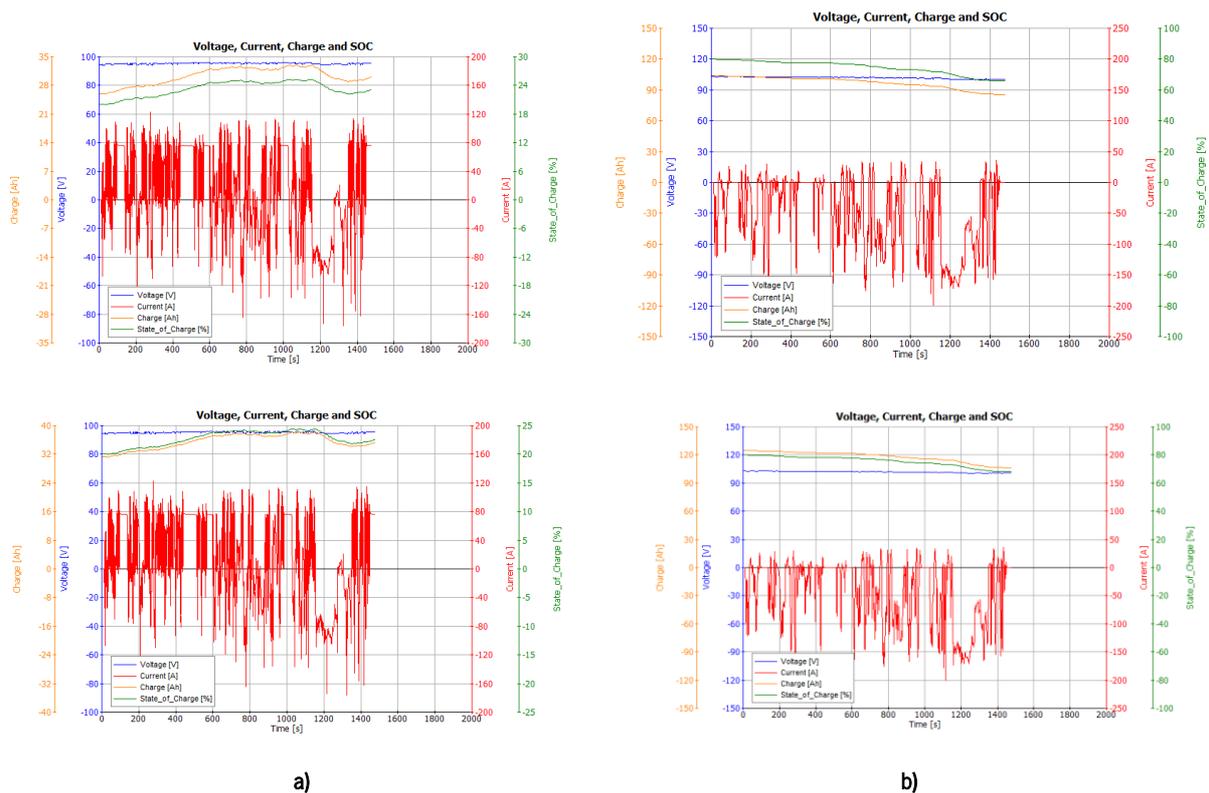


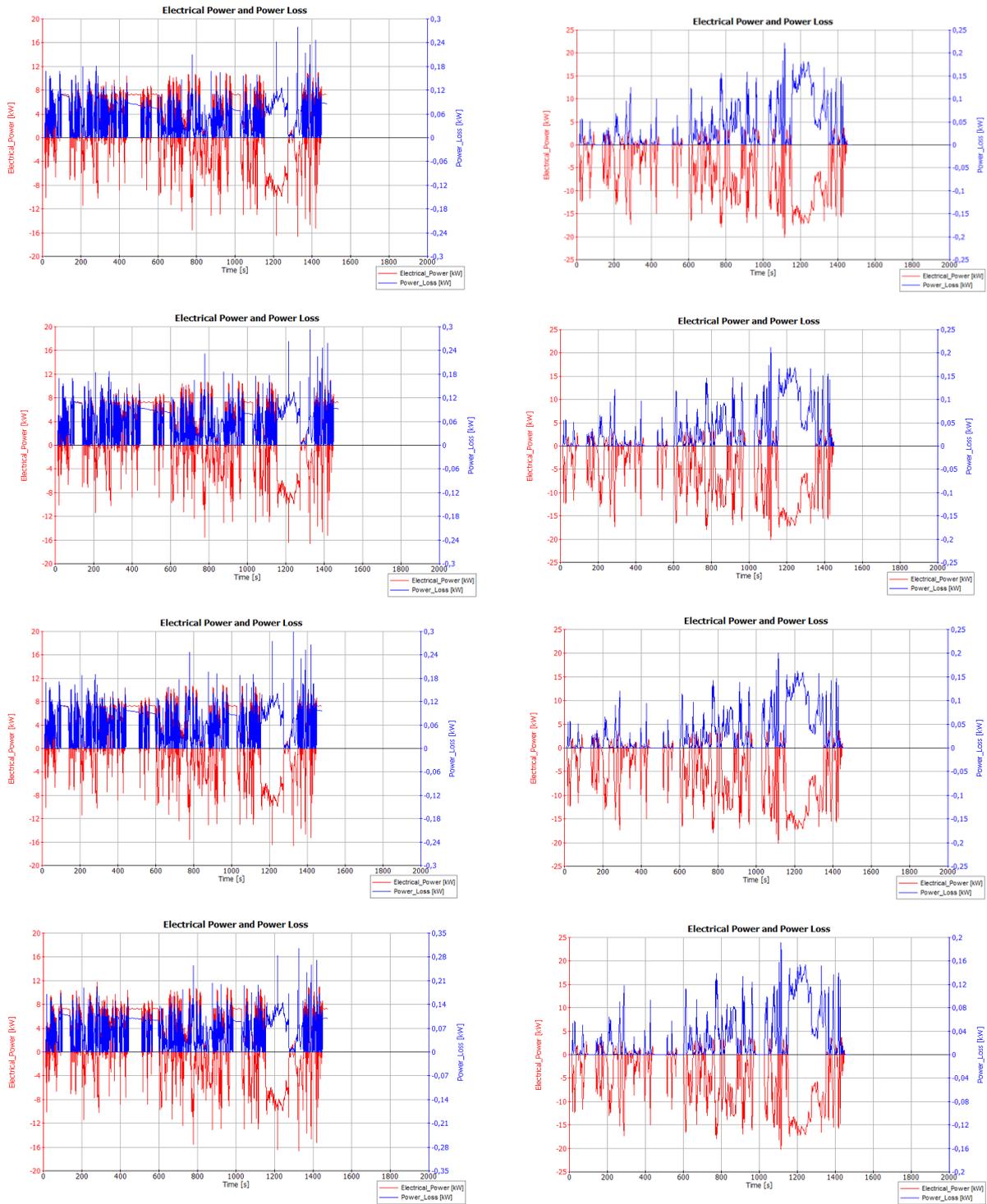
Figura 138 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC, para 1 000 kg de peso, nas várias capacidades da bateria para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

De modo a ser perceptível em valores a diferença no SoC ao longo das várias capacidades da bateria analisadas, apresenta-se a Tabela 56:

Tabela 56 – Variação do SoC para as capacidades da bateria simuladas.

Capacidade da bateria (kWh)	SoC inicial (%)	SoC final (%)	Variação (%)
7,5	20,00	25,16	5,16
	80,00	55,96	24,04
10	20,00	23,87	3,87
	80,00	62,07	17,93
12,5	20,00	23,10	3,10
	80,00	65,70	14,30
15	20,00	22,58	2,58
	80,00	68,11	11,89

Abaixo estão representados os gráficos relativos às potências elétrica e dissipada, para as capacidades da bateria entre 7,5 e 15 kWh e estado de carga de 20% e 80%:



a) b)
 Figura 139 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

Na Tabela 57 apresentam-se os valores discriminados das potências elétrica e dissipada máximas para todas as capacidades simuladas:

Tabela 57 – Potências elétrica e dissipada máximas para as capacidades da bateria simuladas.

Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Potência elétrica máxima (kW)	Potência dissipada máxima (kW)
7,5	20,00	-16,60	0,28
	80,00	-20,19	0,22
10	20,00	-16,60	0,29
	80,00	-20,19	0,21
12,5	20,00	-16,60	0,30
	80,00	-20,19	0,20
15	20,00	-16,60	0,31
	80,00	-20,19	0,19

Passando para o módulo referente ao gerador, serão apresentados abaixo os gráficos referentes ao binário, rotação e potência mecânica (**Figura 140**):

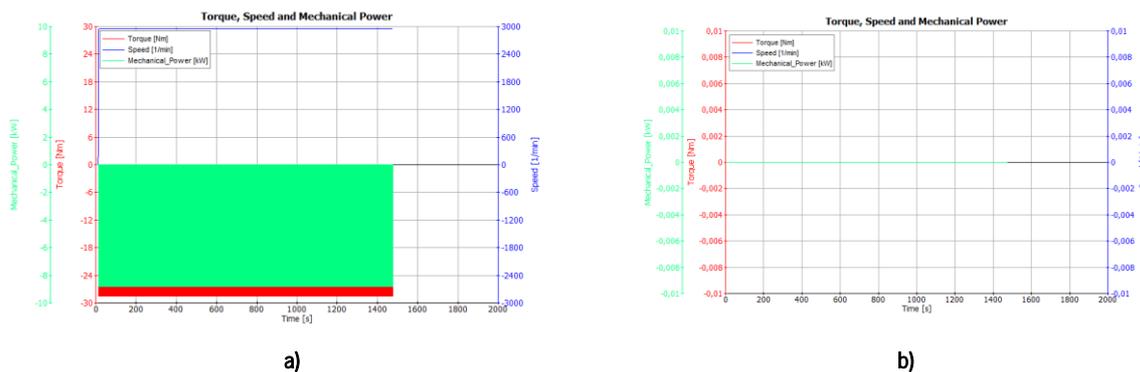


Figura 140 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para 7,5 kWh de capacidade da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

Na **Tabela 58** encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 58 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
20,00	-28.47	2 954	-8,81
80,00	0	0	0

No que respeita ao módulo do motor elétrico, os gráficos seguintes representam o binário, rotação e potência mecânica (**Figura 141**) e binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo (**Figura 142**):

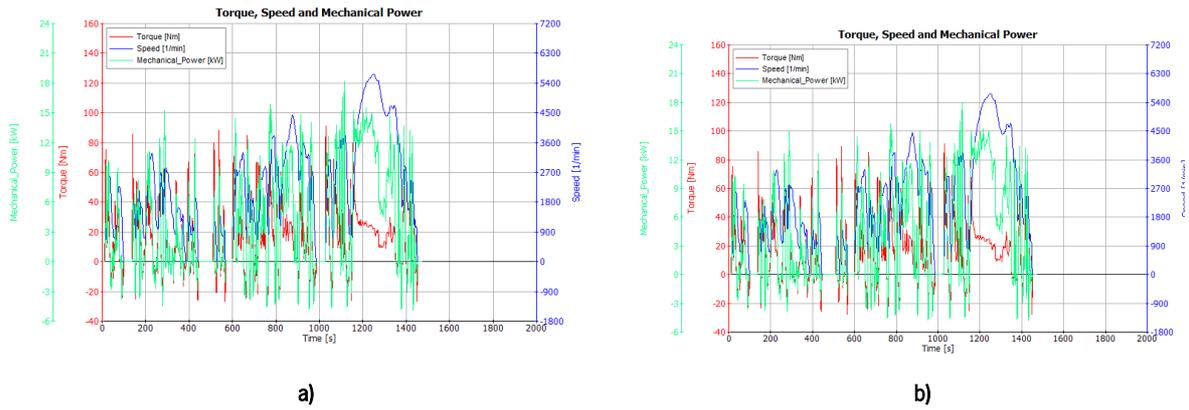


Figura 141 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

Na Tabela 59 encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 59 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
20,00	91,15	5 914	20,94
80,00	90,97		

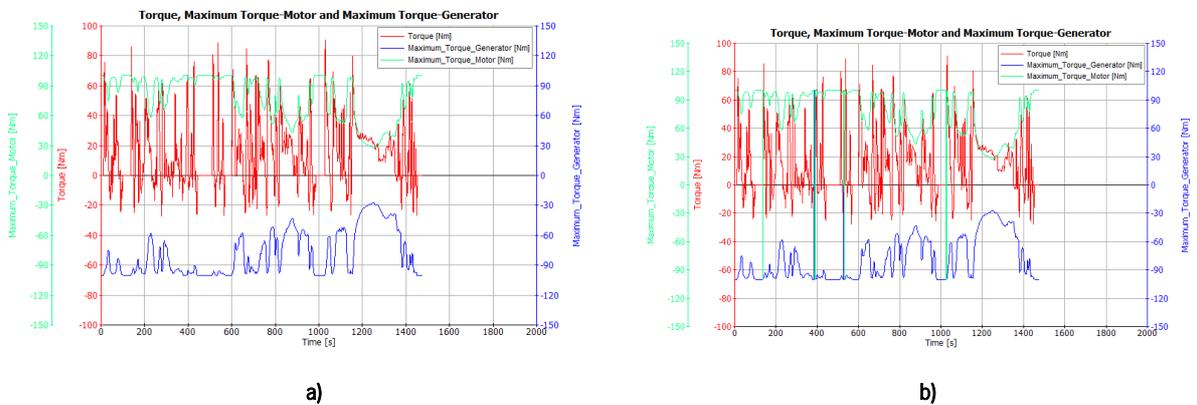


Figura 142 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

Na Tabela 60 encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo:

Tabela 60 – Binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo para as capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Binário – gerador máximo (Nm)	Binário – motor máximo (Nm)
20,00	91,15	-100,50	100,50
80,00	90,96	100,50	

Seguidamente, no módulo do motor térmico, obtiveram-se os gráficos seguintes do binário, potência e rotação do motor (**Figura 143**):

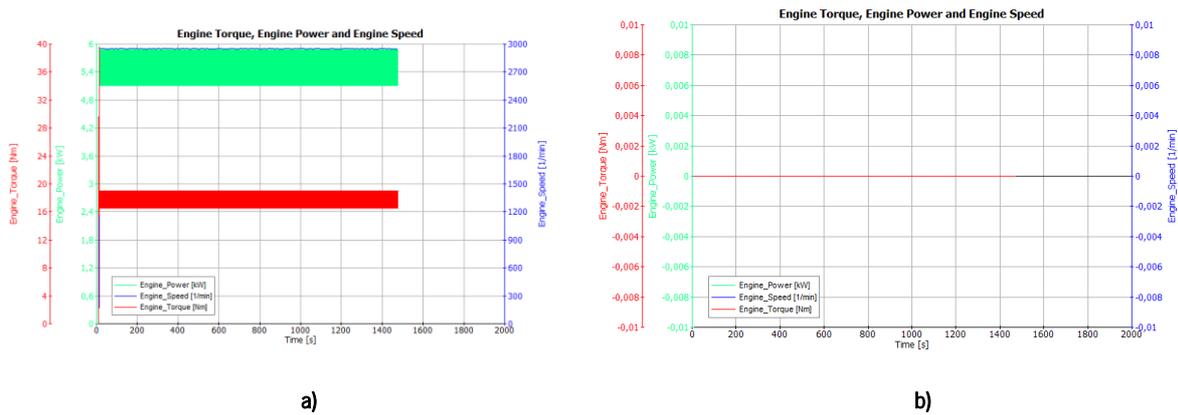


Figura 143 – Variação do binário, potência e rotação do motor para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

Na **Tabela 61** encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 61 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
20,00	39,63	2 954	5,88
80,00	0	0	0

Na aba *Cycle Run*, referente ao ciclo selecionado, é possível obter os gráficos com a variação do consumo elétrico e de combustível (**Figura 144**):

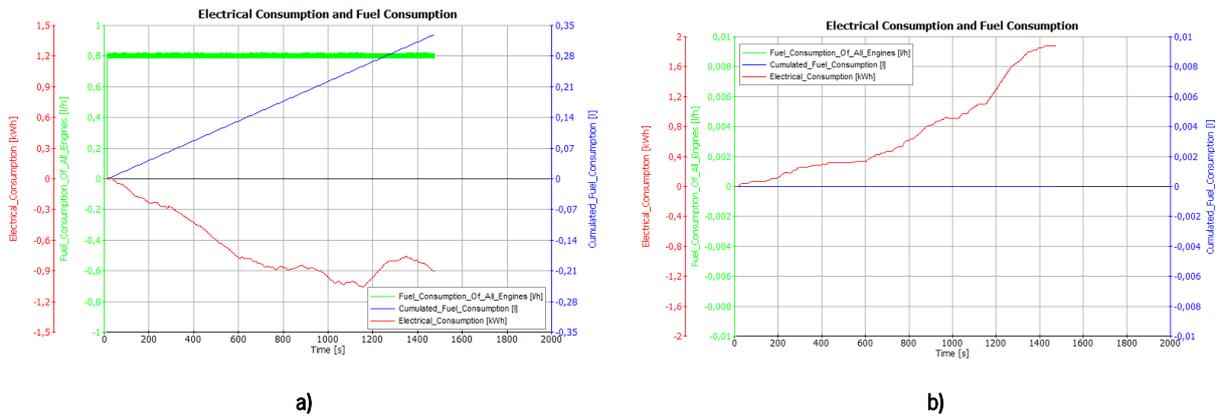


Figura 144 – Variação do consumo elétrico e de combustível para 7,5 kWh de capacidade da bateria, para um SoC de: a) 20%, b) 80%.

Na Tabela 62 encontram-se representados os valores máximos referentes aos consumos elétrico e de combustível:

Tabela 62 – Consumos elétrico e de combustível máximos para as capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Consumo elétrico (kWh)	Consumo de combustível (L/h)
20,00	-1,06	0,82
80,00	1,88	0

02. Estado de carga da bateria (SoC)

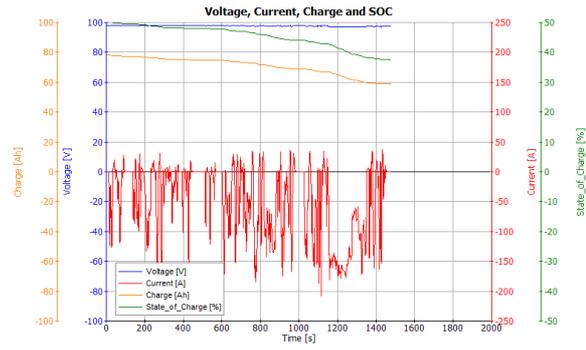
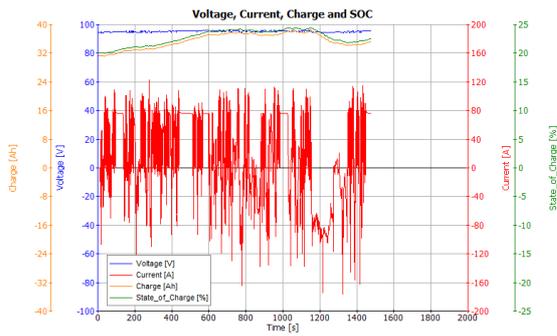
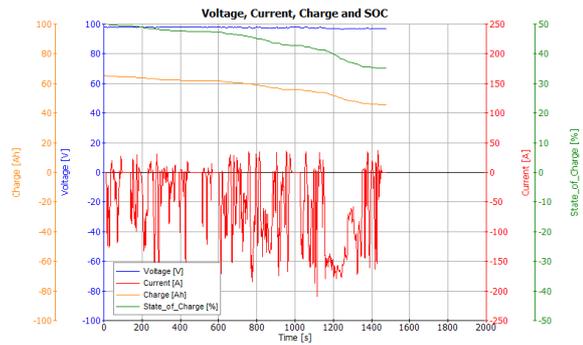
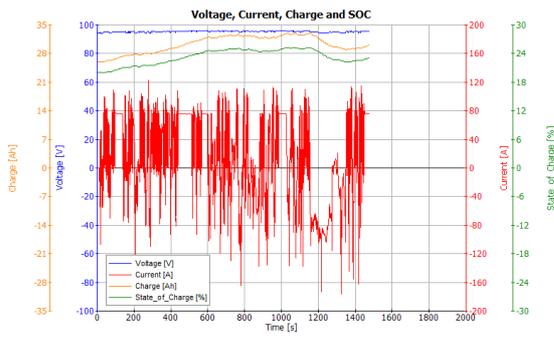
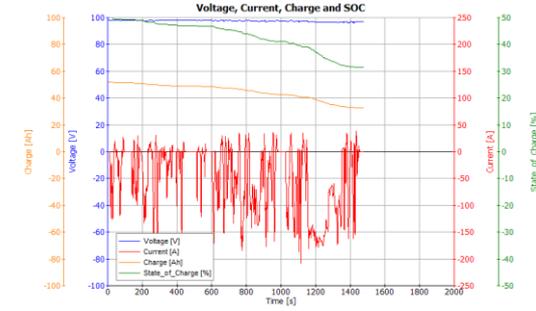
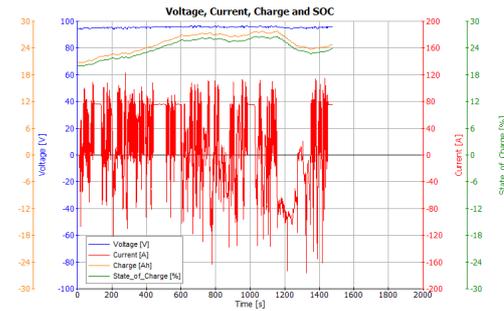
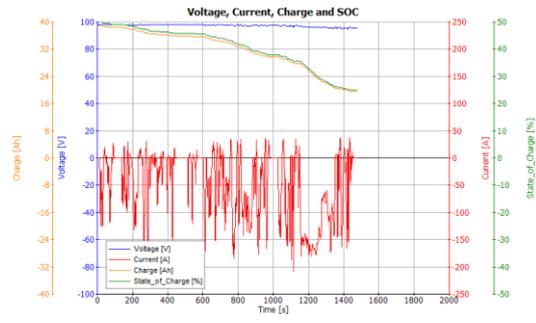
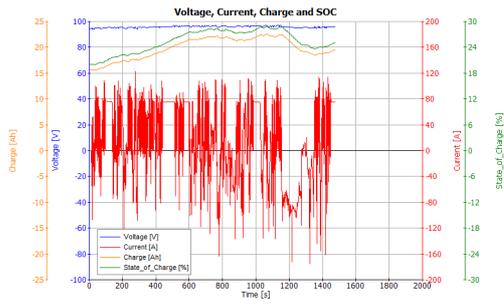
Os parâmetros de entrada referentes ao SoC encontram-se presentes na Figura 145, com os valores da capacidade total da bateria convertidos em Ah.

case	k1	Maximum Charge	k2	Initial Charge	k3	Curb Weight
1	1	7,8125	1	20	1	1000
4	1	7,8125	2	50	1	1000
7	1	7,8125	3	80	1	1000
10	1	7,8125	4	100	1	1000
13	2	10,4165	1	20	1	1000
16	2	10,4165	2	50	1	1000
19	2	10,4165	3	80	1	1000
22	2	10,4165	4	100	1	1000
25	3	13,0205	1	20	1	1000
28	3	13,0205	2	50	1	1000
31	3	13,0205	3	80	1	1000
34	3	13,0205	4	100	1	1000
37	4	15,6245	1	20	1	1000
40	4	15,6245	2	50	1	1000
43	4	15,6245	3	80	1	1000
46	4	15,6245	4	100	1	1000

Figura 145 – Parâmetros de entrada da variável estado de carga da bateria (SoC).

Após a seleção dos parâmetros referentes ao SoC da bateria, procedeu-se à simulação dos mesmos.

Na Figura 146 são apresentados os gráficos referentes à tensão, corrente, capacidade da bateria e estado de carga da bateria (SoC), relativos ao módulo *Battery*:



a)

b)

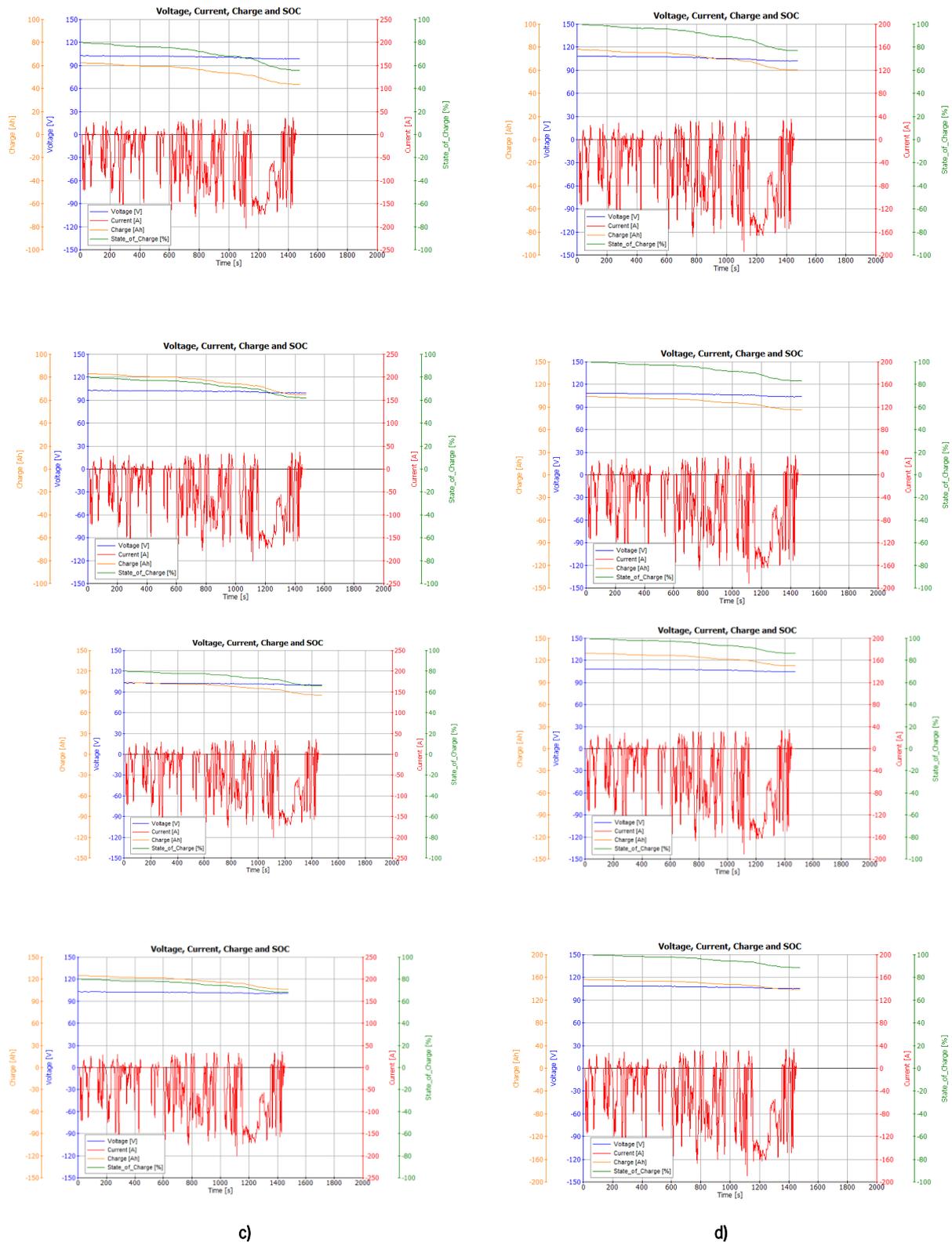


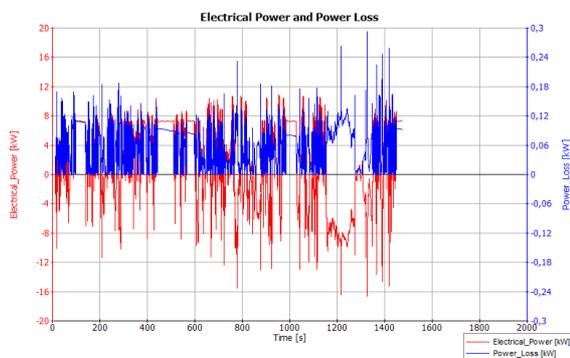
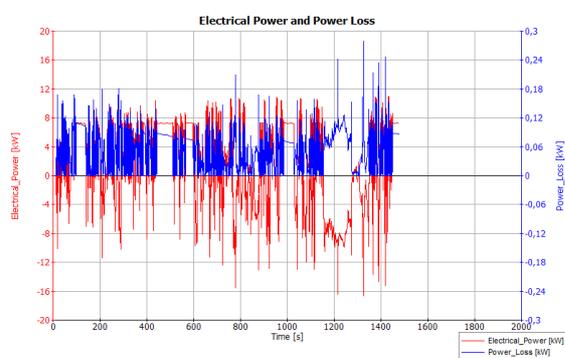
Figura 146 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC nas várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.

De seguida na Tabela 63 apresentam-se as variações do SoC para as diferentes capacidades da bateria, tendo em conta a variação da carga da bateria:

Tabela 63 – Variação do SoC para as capacidades da bateria simuladas.

Capacidade da bateria (kWh)	SoC inicial (%)	SoC final (%)	Variação (%)
7,5	20,00	25,16	5,16
	50,00	25,05	24,95
	80,00	55,96	24,04
	100,00	77,04	22,96
10	20,00	23,87	3,87
	50,00	31,36	18,64
	80,00	62,07	17,93
	100,00	82,92	17,08
12,5	20,00	23,10	3,10
	50,00	35,11	14,89
	80,00	65,70	14,30
	100,00	86,40	13,60
15	20,00	22,58	2,58
	50,00	37,61	12,39
	80,00	68,11	11,89
	100,00	88,70	11,30

Abaixo estão representados os gráficos relativos às potências elétrica e dissipada, ao longo das várias capacidades totais da bateria, serem semelhantes, para os estado de carga de 20%, 50%, 80% e 100%:



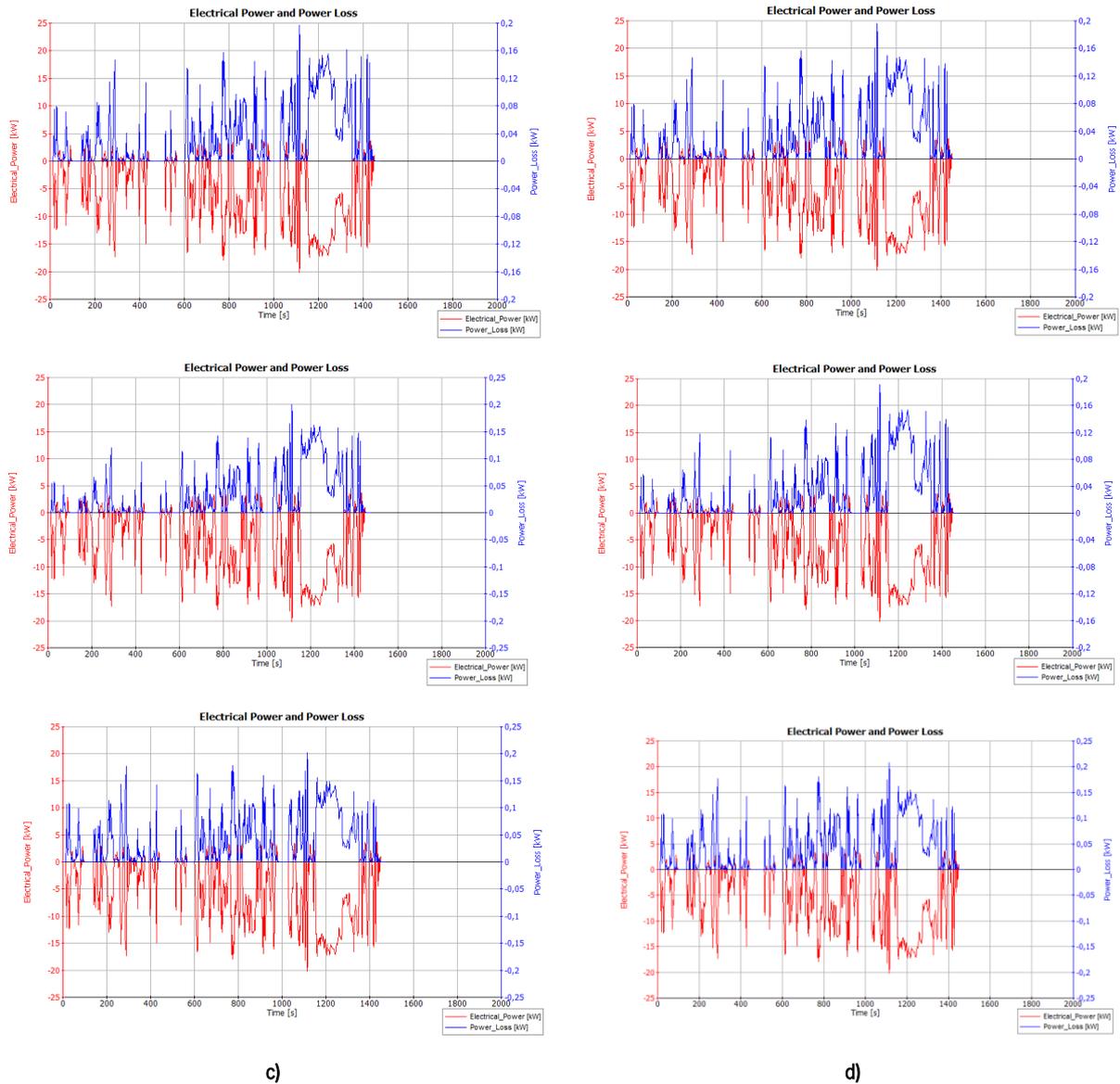


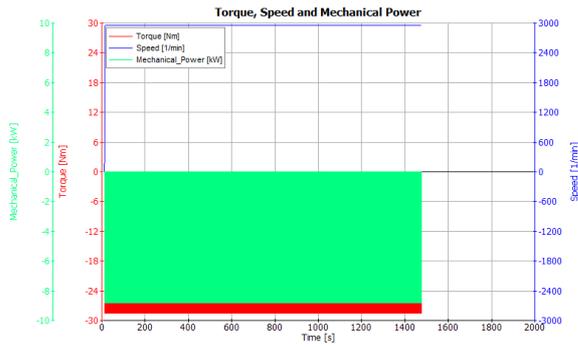
Figura 147 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.

Na Tabela 64 apresentam-se os valores das potências elétrica e dissipada máximas para as capacidades simuladas, tendo como principal variável a alteração do estado de carga da bateria:

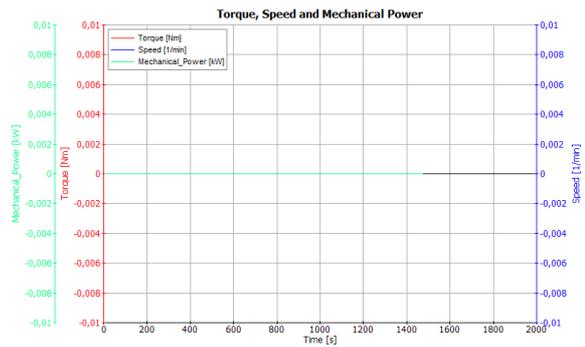
Tabela 64 – Potências elétrica e dissipada máximas para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.

Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Potência elétrica máxima (kW)	Potência dissipada máxima (kW)
7,5	20,00	-16,60	0,28
	50,00	-20,19	0,24
	80,00	-20,19	0,22
	100,00	-20,19	0,24
10	20,00	-16,60	0,29
	50,00	-20,19	0,20
	80,00	-20,19	0,21
	100,00	-20,19	0,19
12,5	20,00	-16,60	0,30
	50,00	-20,19	0,20
	80,00	-20,19	0,20
	100,00	-20,19	0,20
15	20,00	-16,60	0,31
	50,00	-20,19	0,20
	80,00	-20,19	0,19
	100,00	-20,19	0,21

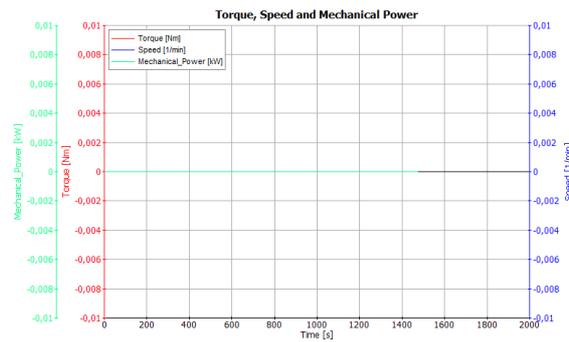
No que respeita ao módulo do gerador, são apresentados abaixo os gráficos referentes ao binário, rotação e potência mecânica (**Figura 148**), sendo que para 20%, 80% e 100% os gráficos obtidos são independentes da capacidade total da bateria considerada, ao passo que para 50% o gráfico obtido estabiliza a partir de 12,5 kWh de capacidade:



a)



b)



c)

d)

Figura 148 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.

Na Tabela 65 encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 65 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
20,00	-28,47	2 954	-8,81
50,00	0	0	0
80,00	0	0	0
100,00	0	0	0

No que respeita ao módulo do motor elétrico, os gráficos seguintes representam o binário, rotação e potência mecânica (Figura 149) e binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo (Figura 150):

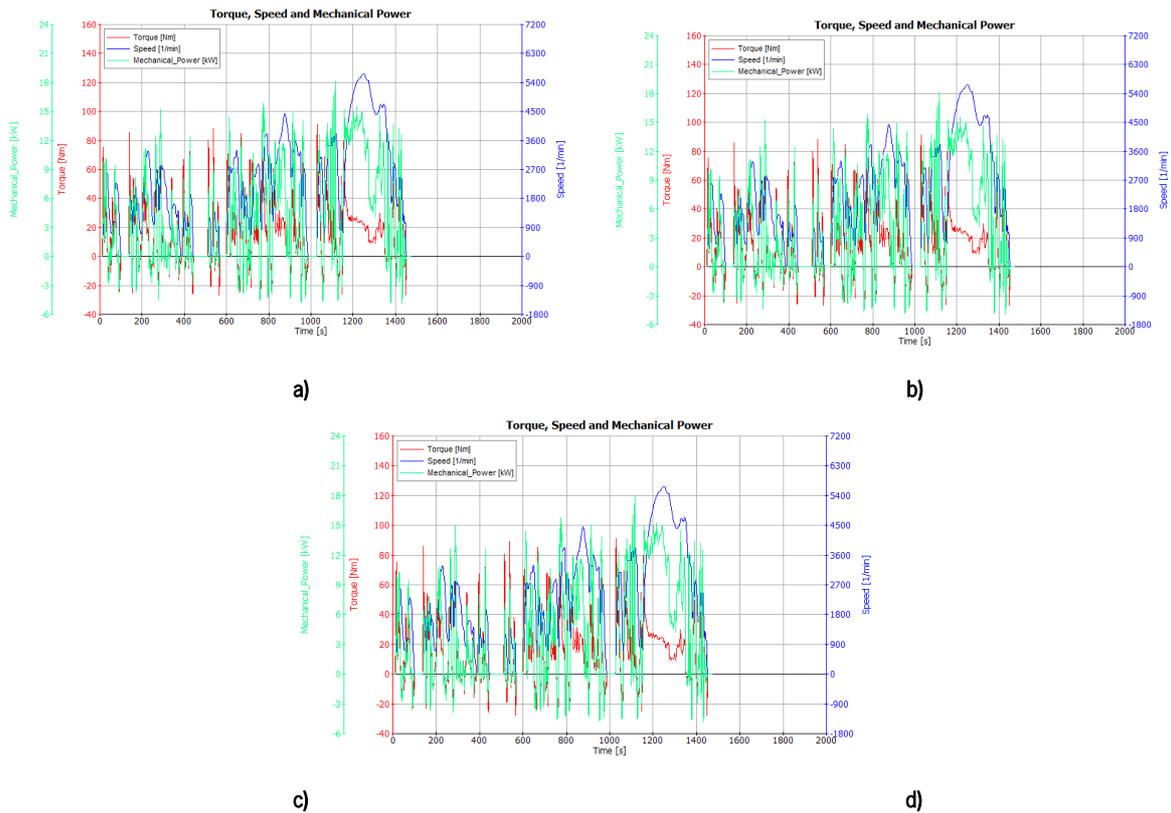
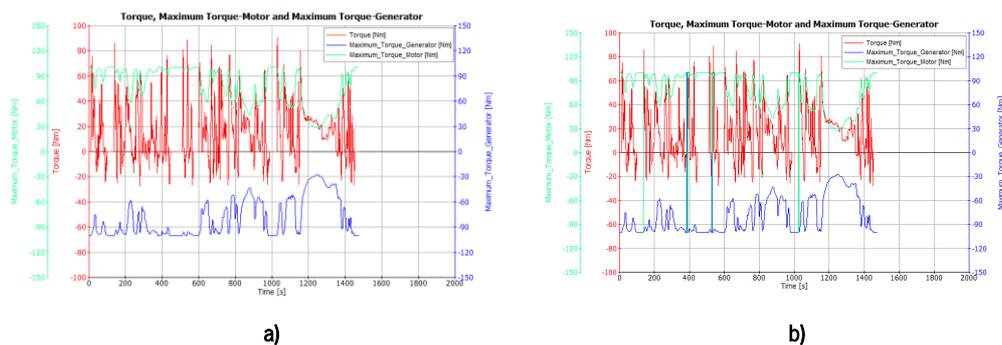


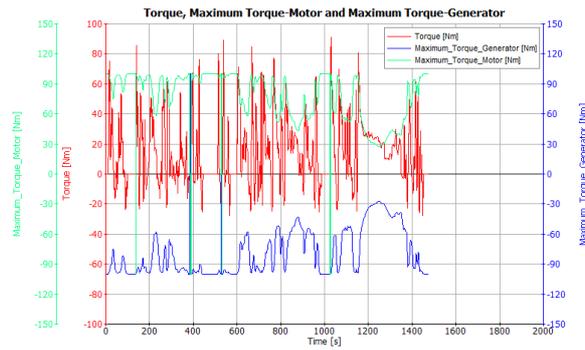
Figura 149 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.

Na Tabela 66 encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 66 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
20,00	91,15		
50,00	90,97		
80,00	90,97	5 657	18,16
100,00	90,97		





c)

d)

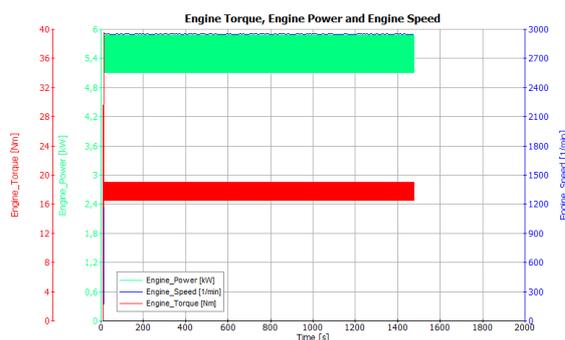
Figura 150 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.

Na **Tabela 67** encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo:

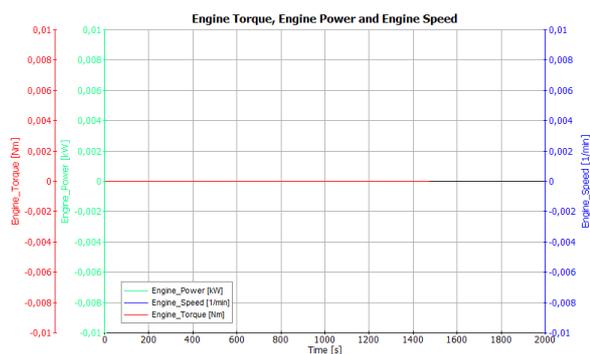
Tabela 67 – Binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Binário – gerador máximo (Nm)	Binário – motor máximo (Nm)
20,00	91,15	-100,50	
50,00	90,97	100,50	
80,00	90,97	100,50	100,50
100,00	90,97	100,50	

Seguidamente, no módulo do motor térmico, obtiveram-se os gráficos seguintes do binário, potência e rotação do motor (**Figura 151**):



a)



b)



c)

d)

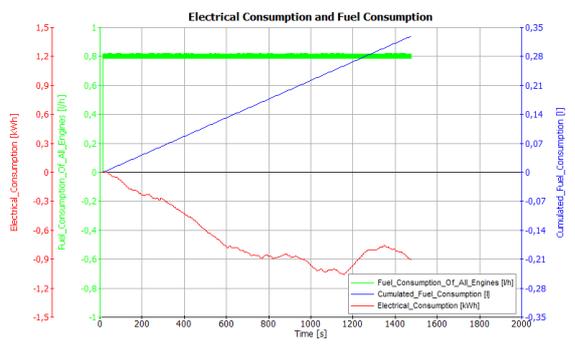
Figura 151 – Variação do binário, potência e rotação do motor para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.

Na Tabela 68 encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

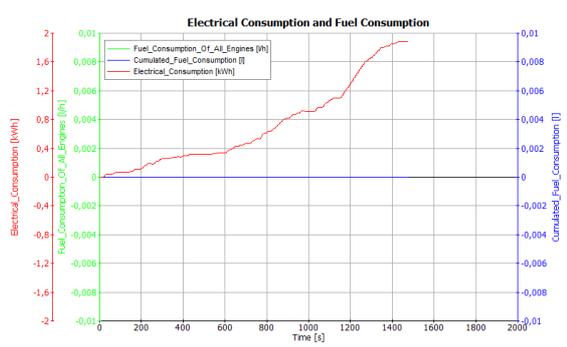
Tabela 68 – Binário, rotação e potência mecânica para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
20,00	39,63	2 954	5,88
50,00			
80,00	0	0	0
100,00			

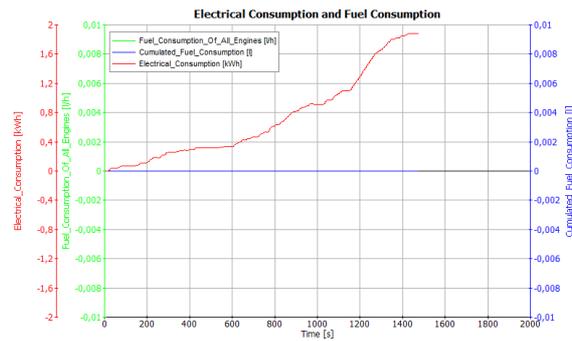
Na aba *Cycle Run*, referente ao ciclo selecionado, é possível obter os gráficos com a variação do consumo elétrico e de combustível (Figura 152):



a)



b)



c)

d)

Figura 152 – Variação do consumo elétrico e de combustível para as várias capacidades da bateria e 1 000 kg de massa do veículo, para um SoC de: a) 20%, b) 50%, c) 80%, d) 100%.

Na Tabela 69 encontram-se representados os valores máximos referentes aos consumos elétrico e de combustível:

Tabela 69 – Consumos elétrico e de combustível máximos para os diferentes SoC das capacidades da bateria simuladas.

SoC (%)	Consumo elétrico (kWh)	Consumo de combustível (L/h)
20,00	-1,06	0,82
50,00		
80,00	1,88	0
100,00		

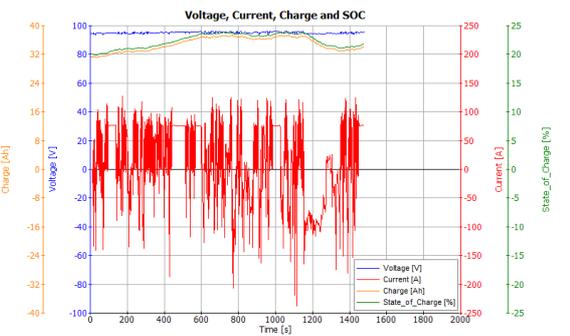
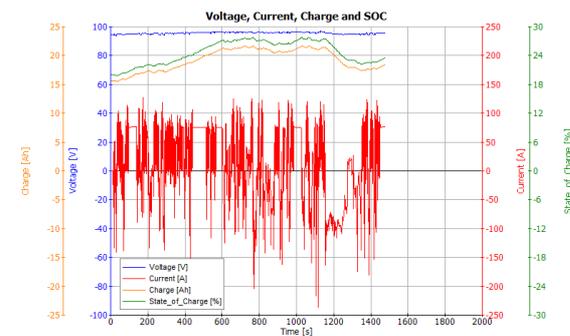
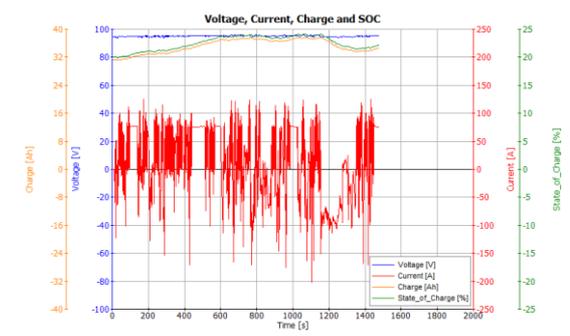
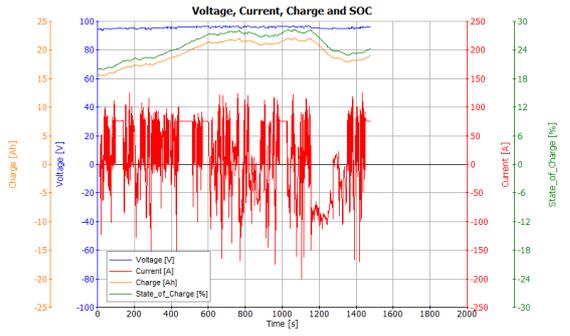
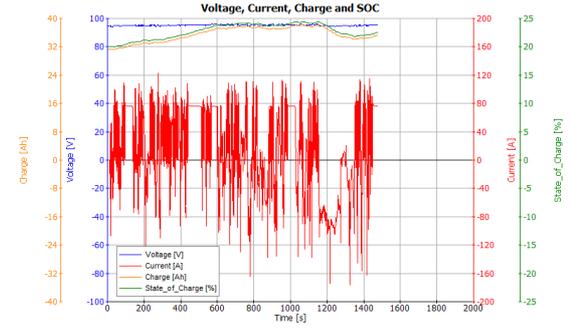
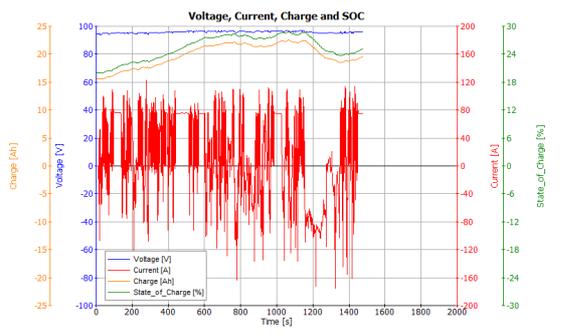
03. Massa do veículo

Os parâmetros de entrada referentes à massa do veículo encontram-se presentes na Figura 153, com os valores da capacidade total da bateria convertidos em Ah.

case	k1	Maximum Charge	k2	Initial Charge	k3	Curb Weight
1	1	7,8125	1	20	1	1000
2	1	7,8125	1	20	2	1100
3	1	7,8125	1	20	3	1200
7	1	7,8125	3	80	1	1000
8	1	7,8125	3	80	2	1100
9	1	7,8125	3	80	3	1200
37	4	15,6245	1	20	1	1000
38	4	15,6245	1	20	2	1100
39	4	15,6245	1	20	3	1200
43	4	15,6245	3	80	1	1000
44	4	15,6245	3	80	2	1100
45	4	15,6245	3	80	3	1200

Figura 153 – Parâmetros de entrada da variável massa do veículo.

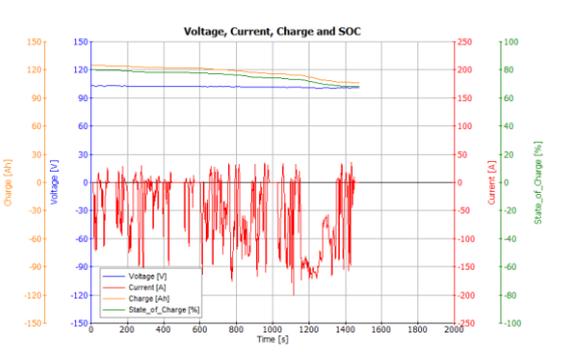
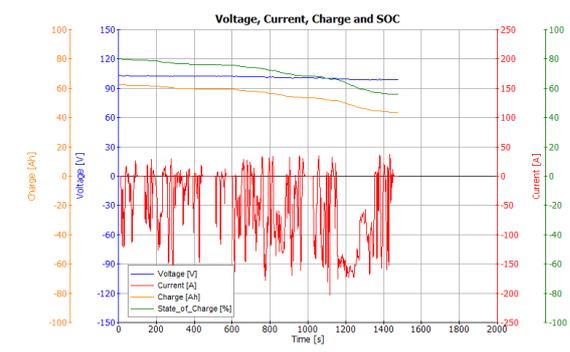
Após a seleção dos parâmetros referentes ao SoC da bateria, procedeu-se à simulação dos mesmos. Na Figura 154 e Figura 155 são apresentados os gráficos referentes à tensão, corrente, capacidade da bateria e estado de carga da bateria (SoC), relativos ao módulo *Battery*:



a)

b)

Figura 154 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.



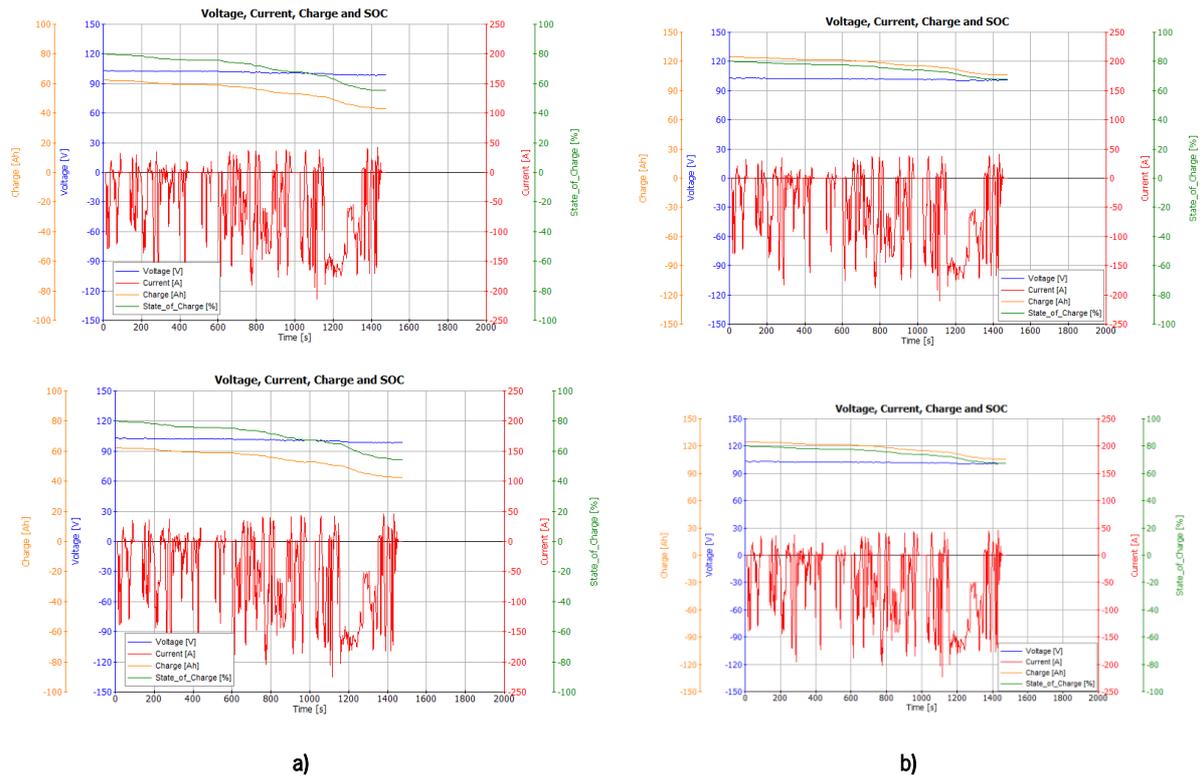


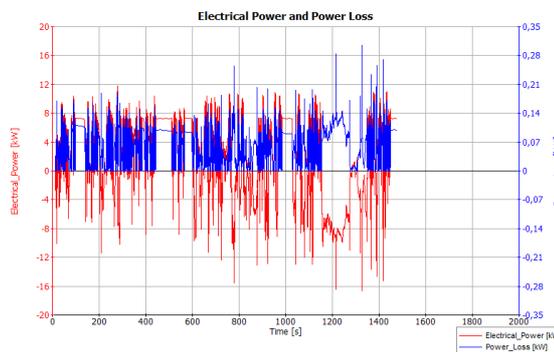
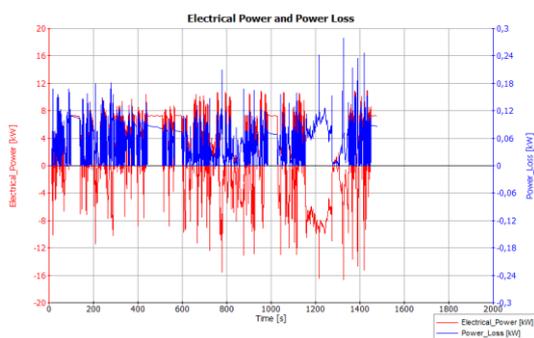
Figura 155 – Variação da tensão, corrente, capacidade da bateria e SoC para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

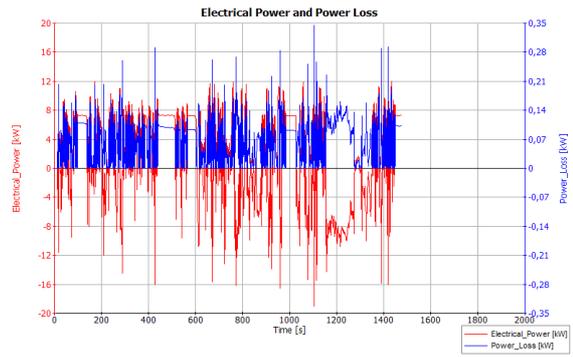
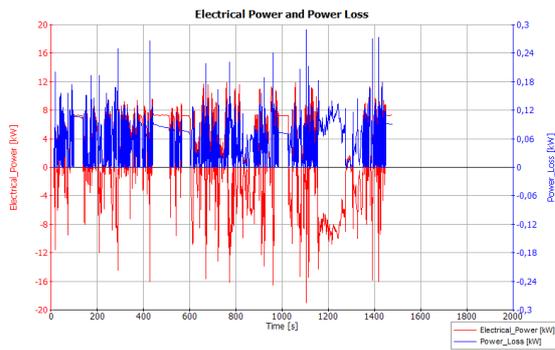
De modo a ser perceptível em valores a diferença no SoC ao longo das várias capacidades da bateria analisadas, apresenta-se a Tabela 70:

Tabela 70 – Variação do SoC para as massas do veículo simuladas.

Massa do veículo (kg)	Capacidade da bateria (kWh)	SoC inicial (%)	SoC final (%)	Variação (%)
1 000	7,5	20,00	25,16	5,16
		80,00	55,96	24,04
1 100		20,00	24,37	4,37
		80,00	55,22	24,78
1 200		20,00	23,61	3,61
		80,00	54,47	25,53
1 000	15	20,00	22,58	2,58
		80,00	68,11	11,89
1 100		20,00	22,18	2,18
		80,00	67,74	12,26
1 200		20,00	21,80	1,80
		80,00	67,38	12,62

Abaixo estão representados os gráficos relativos às potências elétrica e dissipada, para as massas do veículo simuladas neste subcapítulo, nas anteriormente referidas capacidades totais da bateria e estados de carga iniciais. Para o SoC de 80%, como os gráficos são iguais independentemente da massa do veículo considera, apenas se encontra representado um gráfico para cada capacidade total da bateria:

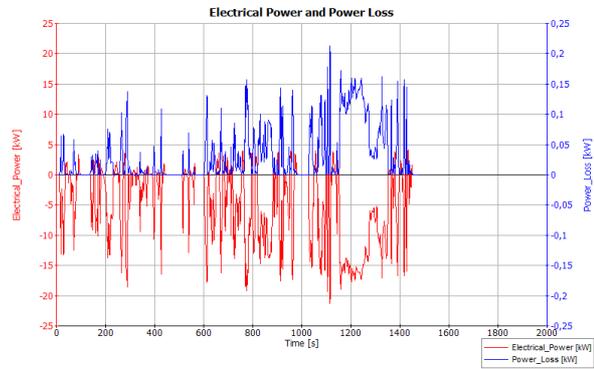
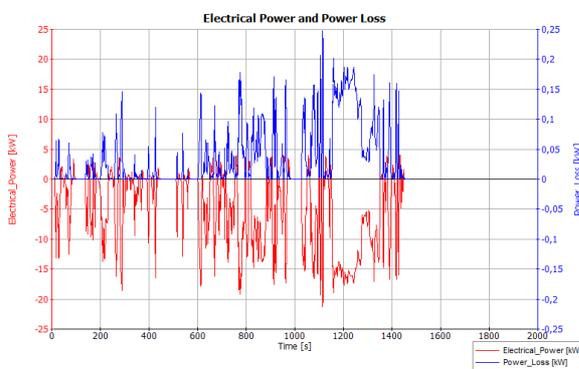
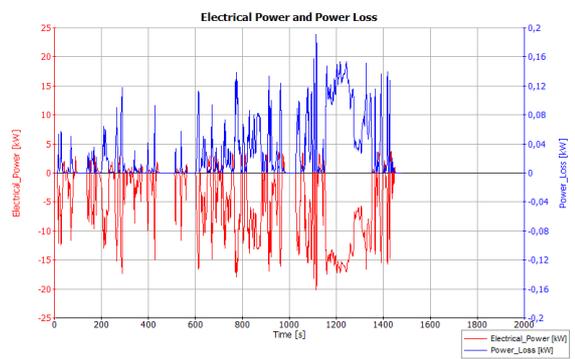
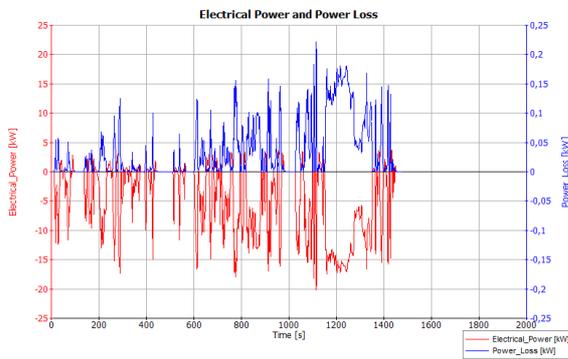




a)

b)

Figura 156 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.



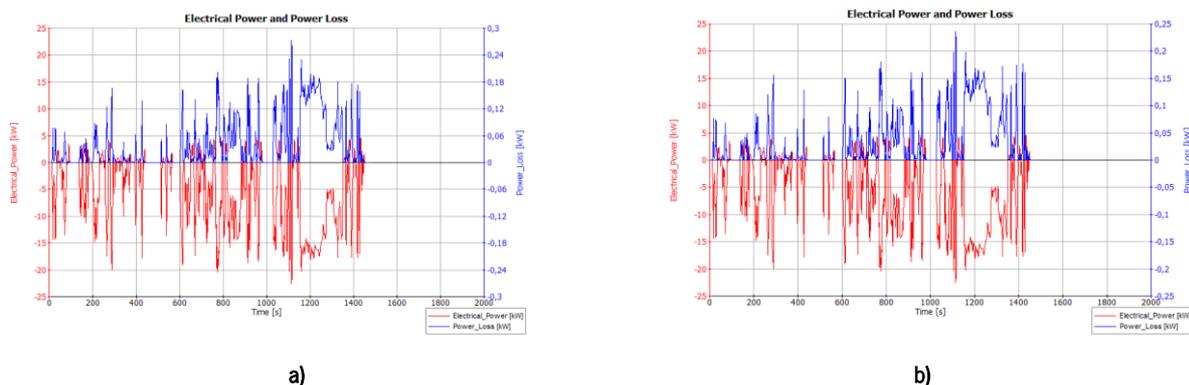


Figura 157 – Variação da potência elétrica e da potência dissipada para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

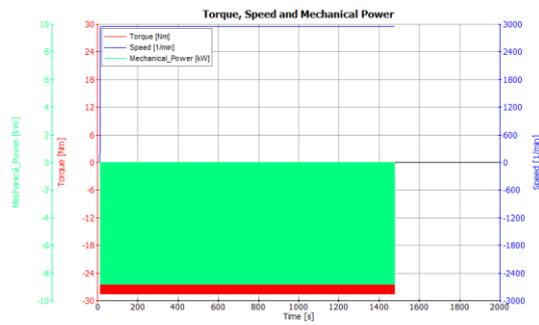
Na **Tabela 71** apresentam-se os valores das potências elétrica e dissipada máximas para as capacidades simuladas, tendo como principal variável a alteração do estado de carga da bateria:

Tabela 71 – Potências elétrica e dissipada máximas para as massas do veículo simuladas.

Massa do veículo (kg)	Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Potência elétrica máxima (kW)	Potência dissipada máxima (kW)
1 000		20,00	-16,60	0,28
		80,00	-20,19	0,22
1 100	7,5	20,00	-19,04	0,29
		80,00	-21,34	0,25
1 200		20,00	-19,04	0,39
		80,00	-22,47	0,27
1 000		20,00	-16,60	0,31
		80,00	-20,19	0,19
1 100	15	20,00	-19,04	0,34
		80,00	-21,34	0,21
1 200		20,00	-22,36	0,45
		80,00	-22,47	0,24

No que respeita ao módulo do gerador, serão apresentados abaixo os gráficos referentes ao binário, rotação e potência mecânica (**Figura 158** e **Figura 159**). Como não se verificaram alterações ao alterar

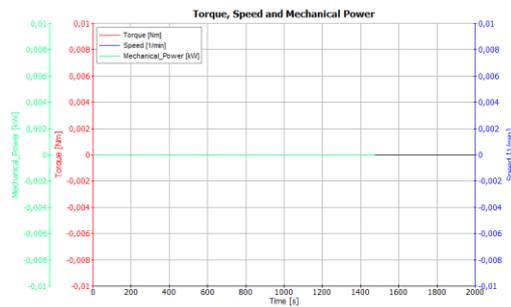
a massa do veículo para o mesmo SoC, apenas se encontra representado um gráfico para cada capacidade total da bateria:



a)

b)

Figura 158 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.



a)

b)

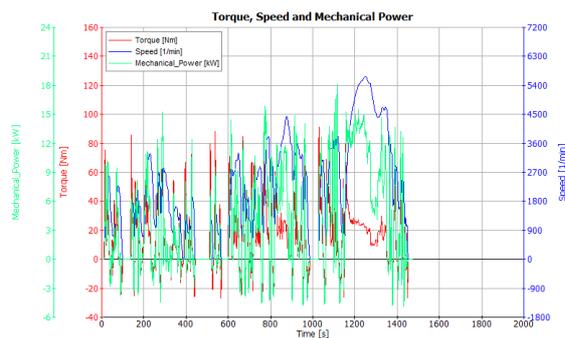
Figura 159 – Variação do binário, rotação e potência mecânica para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

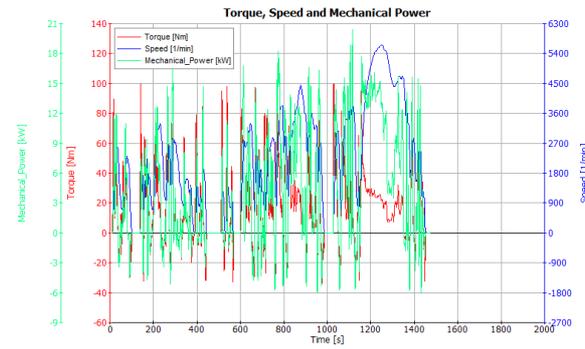
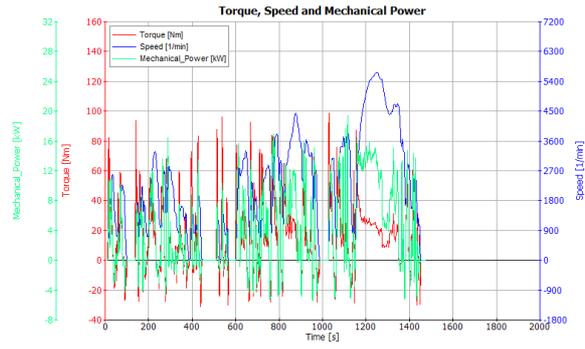
Na **Tabela 72** encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 72 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as massas do veículo simuladas.

Massa do veículo (kg)	Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
1 000		20,00	-28,47	2 954	-8,81
1 100	7,5	80,00	0	0	0
1 200					
1 000		20,00	-28,47	2 954	-8,81
1 100	15	80,00	0	0	0
1 200					

No que respeita ao módulo do motor elétrico, os gráficos seguintes representam o binário, rotação e potência mecânica (**Figura 160 e Figura 161**) e binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo (**Figura 162 e Figura 163**):

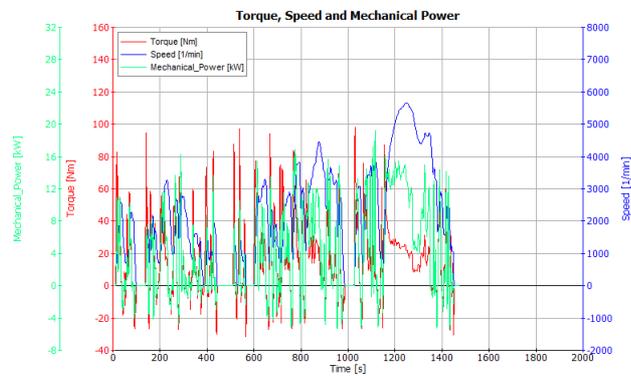
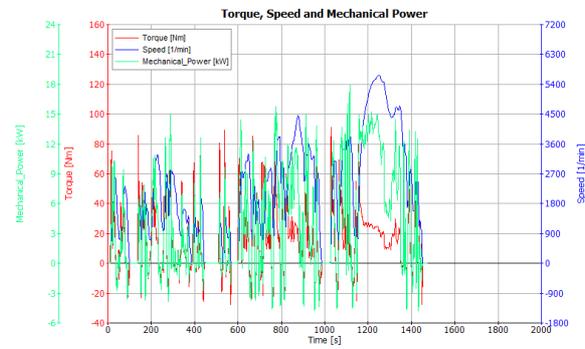




a)

b)

Figura 160 – Variação do binário, rotação e potência mecânica máximo para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.



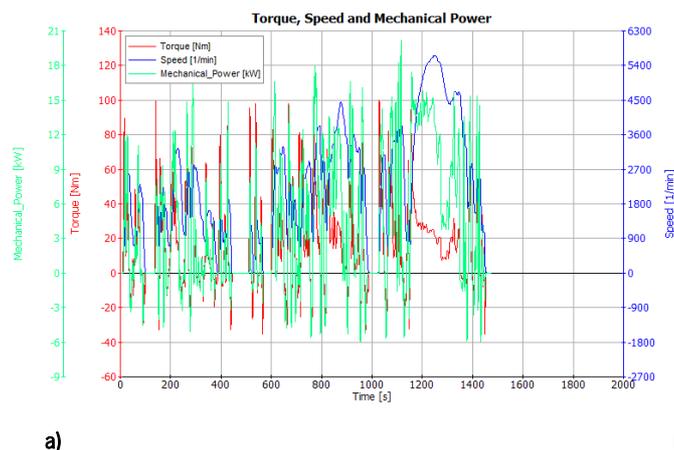
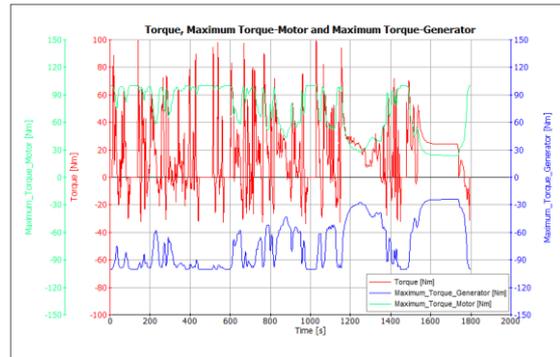
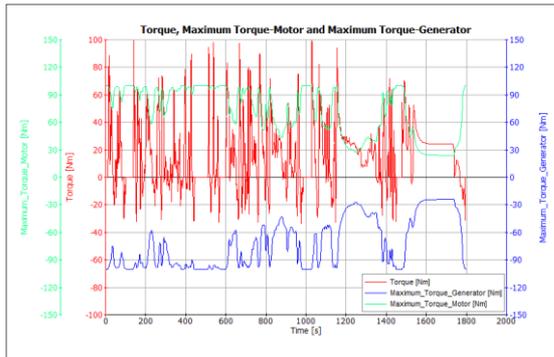
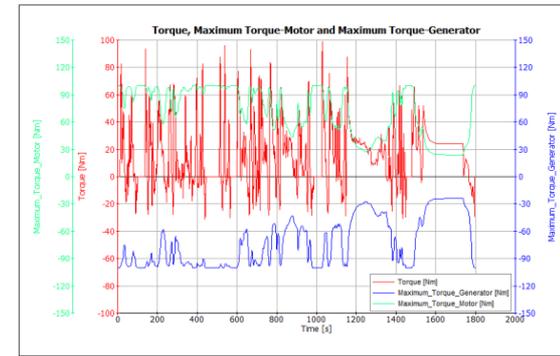
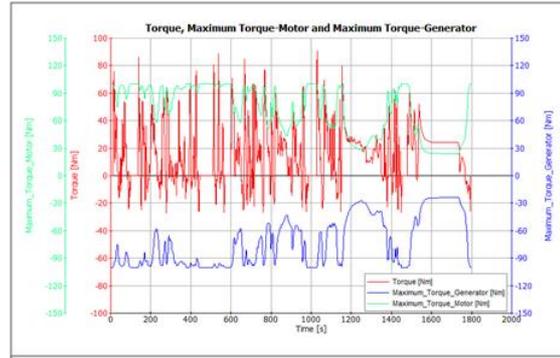
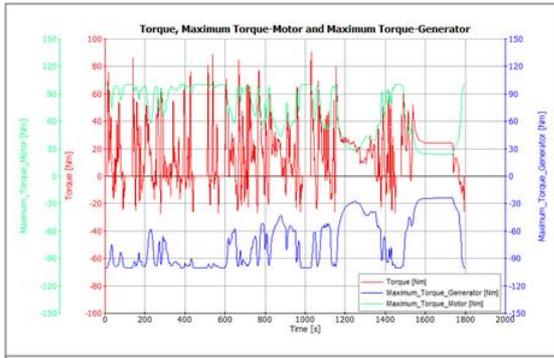


Figura 161 – Variação do binário, rotação e potência mecânica máxima para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

Na **Tabela 73** encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 73 – Binário, rotação e potência mecânica máximas para as massas do veículo simuladas.

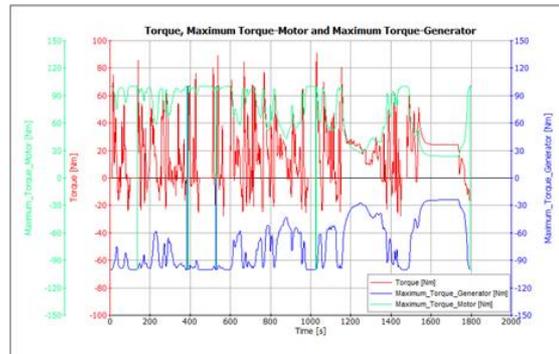
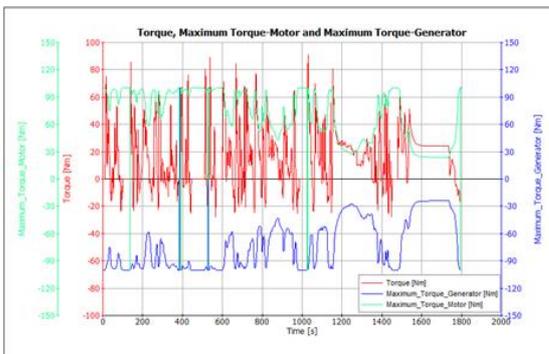
Massa do veículo (kg)	Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
1 000	7,5	20,00	91,15	5 657	18,16
		80,00	90,97		18,09
1 100	7,5	20,00	98,82	5 657	19,38
		80,00	98,72		19,19
1 200	7,5	20,00	99,86	5 657	20,39
		80,00	99,86		20,22
1 000	15	20,00	91,15	5 657	18,16
		80,00	90,97		18,09
1 100	15	20,00	98,82	5 657	19,38
		80,00	98,72		19,19
1 200	15	20,00	99,86	5 657	20,39
		80,00	99,86		20,22



a)

b)

Figura 162 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.



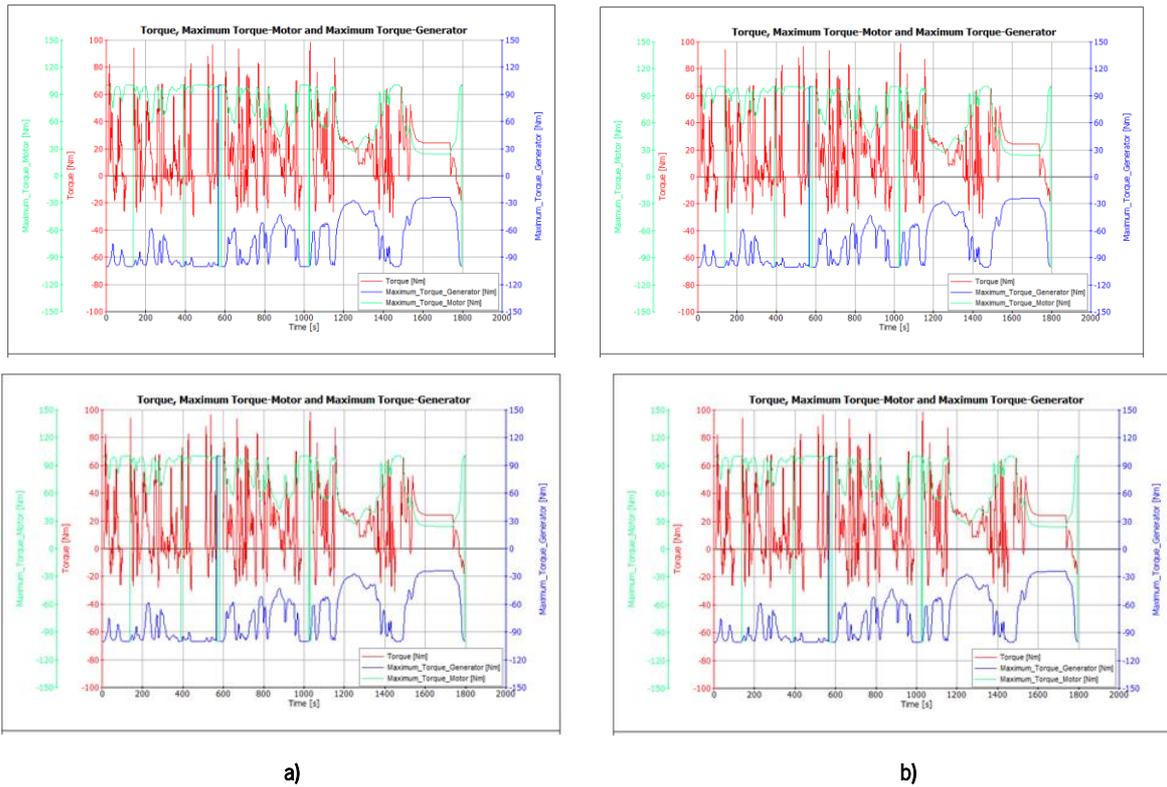


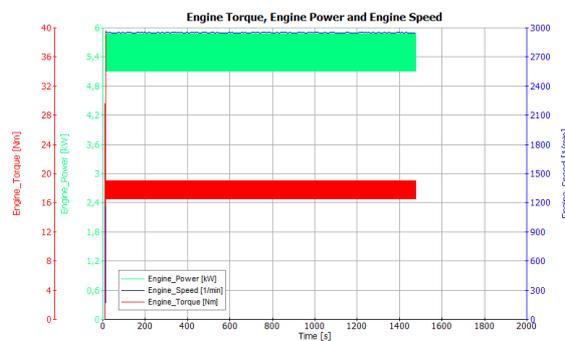
Figura 163 – Variação do binário, binário-motor máximo e binário-gerador máximo para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

Na Tabela 74 encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo:

Tabela 74 – Binário, binário-gerador máximo e binário-motor máximo para as massas do veículo simuladas.

Massa do veículo (kg)	Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Binário (Nm)	Binário – gerador máximo (Nm)	Binário-motor máximo (Nm)
1 000	7,5	20,00	91,15	-100,50	
		80,00	90,97	100,50	
20,00		98,82	-100,50		
80,00		98,71	100,50	100,50	
20,00		99,86	-100,50		
80,00		99,86	100,50		
1 100	15	20,00	91,15	-100,50	
		80,00	90,97	100,50	
20,00		98,82	-100,50		
80,00		98,71	100,50	100,50	
20,00		99,86	-100,50		
80,00		99,86	100,50		

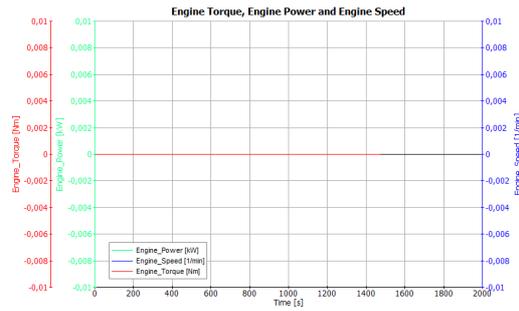
Seguidamente, no módulo do motor térmico, obtiveram-se os gráficos seguintes do binário, potência e rotação do motor (Figura 164 e Figura 165):



a)

b)

Figura 164 – Variação do binário, potência e rotação do motor para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.



c)

d)

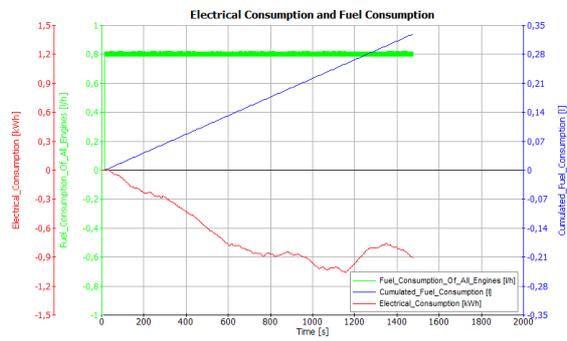
Figura 165 – Variação do binário, potência e rotação do motor para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

Na **Tabela 75** encontram-se representados os valores máximos referentes às variáveis binário, rotação e potência mecânica:

Tabela 75 – Binário, rotação e potência mecânica para as massas do veículo simuladas.

Massa do veículo (kg)	Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Binário (Nm)	Rotações (rpm)	Potência mecânica (kW)
1 000	7,5	20,00	39,63	2 954	5,88
		80,00	0	0	0
20,00		39,63	2 954	5,88	
80,00		0	0	0	
1 100	15	20,00	39,63	2 954	5,88
		80,00	0	0	0
20,00		39,63	2 954	5,88	
80,00		0	0	0	
1 200	15	20,00	39,63	2 954	5,88
		80,00	0	0	0
20,00		39,63	2 954	5,88	
80,00		0	0	0	

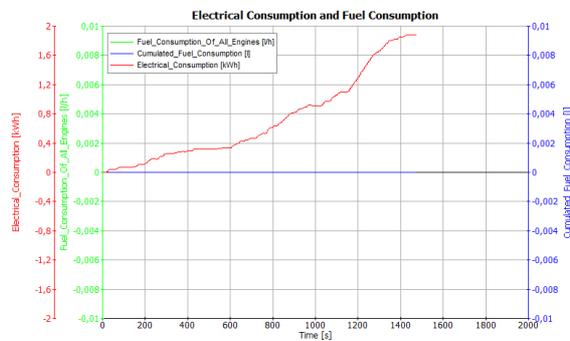
Na aba *Cycle Run*, referente ao ciclo selecionado, é possível obter os gráficos com a variação do consumo elétrico e de combustível (Figura 166 e Figura 167):



a)

b)

Figura 166 – Variação do consumo elétrico e de combustível para um SoC de 20%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.



a)

b)

Figura 167 – Variação do consumo elétrico e de combustível para um SoC de 80%, referentes à massa do veículo, para uma capacidade total da bateria de: a) 7,5 kWh, b) 15 kWh.

Na Tabela 76 encontram-se representados os valores máximos referentes aos consumos elétrico e de combustível:

Tabela 76 – Consumos elétrico e de combustível máximos para as massas do veículo simuladas.

Massa do veículo (kg)	Capacidade da bateria (kWh)	SoC (%)	Consumo elétrico (kWh)	Consumo de combustível (L/h)
1 000	7,5	20,00	-1,06	0,82
		80,00	3,08	0
1 100		20,00	-1,01	0,82
		80,00	3,14	0
1 200		20,00	-0,97	0,82
		80,00	3,20	0
1 000	15	20,00	-1,06	0,82
		80,00	3,08	0
1 100		20,00	-1,01	0,82
		80,00	3,14	0
1 200		20,00	-0,97	0,82
		80,00	3,20	0

ANEXO P – CUSTOS DA CONVERSÃO DO VEÍCULO

Tabela 77 – Custos da conversão do veículo [57] [58] [137] [138].

Componente	Preço
Veículo	10 500 €
<i>Kit de conversão</i>	4 250,93 €*
Gerador	1 635,31 €*
Motor térmico	1 085 €
Custo total	17 471,24 €

NOTA: Os valores assinalados a asterisco referem-se ao câmbio a 31/12/2021.

ANEXO Q – VALOR AMORTIZADO ATÉ AO ANO DE 2030

Tabela 78 – Projeção do custo da gasolina 95 simples e da tarifa de eletricidade até ao ano de 2030.

Ano	Preço da gasolina 95	Preço da eletricidade tarifa simples	Preço da eletricidade tarifa bi-horária (fora do vazio)	Preço da eletricidade tarifa bi-horária (vazio)
2022	1,742 €	0,1485 €	0,1832 €	0,0925 €
2023	1,765 €	0,1504 €	0,1856 €	0,0937 €
2024	1,788 €	0,1524 €	0,1880 €	0,0949 €
2025	1,811 €	0,1544 €	0,1904 €	0,0961 €
2026	1,835 €	0,1564 €	0,1929 €	0,0973 €
2027	1,859 €	0,1584 €	0,1954 €	0,0986 €
2028	1,883 €	0,1605 €	0,1979 €	0,0999 €
2029	1,907 €	0,1626 €	0,2005 €	0,1012 €
2030	1,932 €	0,1647 €	0,2031 €	0,1025 €

Tabela 79 – Evolução da amortização do investimento em função do custo dos combustíveis/electricidade e poupança alcançada com a conversão.

Ano	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Litros de gasolina gastos por ano (antes da conversão)	2 100								
Preço do litro de gasolina simples 95	1,742 €	1,765 €	1,788 €	1,811 €	1,835 €	1,859 €	1,883 €	1,907 €	1,932 €
Custo da gasolina (antes da conversão)	3 658,20 €	3 706,50 €	3 754,80 €	3 803,10 €	3 853,50 €	3 903,90 €	3 954,30 €	4 004,70 €	4 057,20 €
Litros de gasolina gastos por ano (após a conversão)	864								
Preço do litro de gasolina simples 95	1,742 €	1,765 €	1,788 €	1,811 €	1,835 €	1,859 €	1,883 €	1,907 €	1,932 €
Custo da gasolina (após a conversão)	1 505,09 €	1 524,96 €	1 544,83 €	1 564,70 €	1 585,44 €	1 606,18 €	1 626,91 €	1 647,65 €	1 669,25 €
Nº de kWh consumidos por ano	1 998								
Preço da electricidade - tarifa simples	0,1485 €	0,1504 €	0,1524 €	0,1544 €	0,1564 €	0,1584 €	0,1605 €	0,1626 €	0,1647 €
Custo da electricidade - tarifa simples	296,70 €	300,50 €	305,50 €	308,49 €	312,49 €	316,48 €	320,68 €	324,87 €	329,07 €
Preço da electricidade - tarifa bi-horária (fora de vazio)	0,1832 €	0,1856 €	0,1880 €	0,1904 €	0,1929 €	0,1954 €	0,1979 €	0,2005 €	0,2031 €
Custo da electricidade - tarifa bi-horária (fora de vazio)	366,03 €	370,83 €	375,62 €	380,42 €	385,41 €	390,41 €	395,40 €	400,60 €	405,79 €
Preço da electricidade - tarifa bi-horária (vazio)	0,0925 €	0,0937 €	0,0949 €	0,0961 €	0,0973 €	0,0986 €	0,0999 €	0,1012 €	0,1025 €

Custo da electricidade - tarifa bi-horária (vazio)	184,82 €	187,21 €	189,61 €	192,01 €	194,41 €	197,00 €	199,60 €	202,20 €	204,80 €
Substituição das baterias									X
Poupança alcançada									
Antes da conversão ↓ Após a conversão (com tarifa simples)	1 856,41 €	1 881,04 €	1 904,47 €	1 929,91 €	1 955,57 €	1 981,24 €	2 006,71 €	2 032,18 €	2 058,88 €
Antes da conversão ↓ Após a conversão (com tarifa simples bi-horária (fora do vazio))	1 787,08 €	1 810,71 €	1 834,35 €	1 857,98 €	1 882,65 €	1 907,31 €	1 931,99 €	1 956,45 €	1 982,16 €
Antes da conversão ↓ Após a conversão (com tarifa simples bi-horária (vazio))	1 968,29 €	1 994,33 €	2 020,36 €	2 046,39 €	2 073,65 €	2 100,72 €	2 127,79 €	2 154,85 €	2 183,15 €
Custo da conversão (referente a 2021)	-17 471,24 €								-2 303,50 €
Amortização do investimento									
Antes da conversão ↓ Após a conversão (com tarifa simples)	-15 614,83 €	-13 733,79 €	-11 829,32 €	-9 899,41 €	-7 943,84 €	-5 962,60 €	-3 955,89 €	-1 923,71 €	-2 168,33 €

Antes da conversão									
↓									
Após a conversão (com tarifa simples bi-horária (fora do vazio))	-15 684,16 €	-13 873,45 €	-12 039,10 €	-10 181,12 €	-8298,47 €	-6 391,16 €	-4 459,17 €	-2 502,72 €	-2 824,06 €
Antes da conversão									
↓									
Após a conversão (com tarifa simples bi-horária (vazio))	-15 502,95 €	-13 508,62 €	-11 488,26 €	-9 441,87 €	-7 368,22 €	-5 267,50 €	-3 139,71 €	-984,86 €	-1 105,21 €