

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



Aos meus pais.

*“O segredo da sabedoria, do poder e do conhecimento
é a humildade”*

Ernest Hemingway

RESUMO

A presente dissertação tem por objectivo relatar o projeto de uma bateria com BMS para uso num veículo eléctrico e contribuir para a melhor integração dos veículos eléctricos, sensibilizando para a necessidade de uma mobilidade mais sustentável com suporte na eletricidade face ao panorama atual energético.

O trabalho inicia-se com a exposição de um estado de arte sobre a evolução do veículo eléctrico com ênfase nos factores que levaram à sua hibernação, assim como as motivações que estiveram na origem do seu regresso e as diferentes arquiteturas atualmente em uso. De seguida, expõem-se o estudo da cinemática do veículo automóvel com formulação das forças que se opõem ao movimento, bem como a potência, velocidade e o binário para as vencer. Analisam-se depois as diferentes tecnologias de armazenamento de energia. Destas são exploradas as que atualmente cumprem melhor os requisitos para uso na mobilidade eléctrica com maior incidência na tecnologia electroquímica à base de Lítio e nos seus desenvolvimentos em curso. Apresentam-se também as funcionalidades que devem ser implementadas por um BMS para supervisão dos parâmetros críticos e a proteção da bateria.

Foi depois escolhido um veículo e com base nas suas especificações procedeu-se ao projeto de eletrificação do sistema propulsor com a escolha de componentes reais. Por aplicação da teoria da cinemática foram formuladas as equações diferenciais que modelizam o comportamento dinâmico do veículo. A partir desses estudos e das especificações encontradas foi projetada uma bateria que permitisse alcançar a autonomia desejada e desenhada uma possível representação do seu aspecto interior e encapsulamento. Com base na modelização formulada foi desenvolvida uma aplicação em MATLAB para a simulação do comportamento do veículo em diferentes cenários. Este modelo permite inferir a ação da variação da massa e da inclinação do pavimento sobre aceleração e a velocidade instantânea e máxima alcançável, assim como a distância percorrida pelo veículo. Com efeito, permite conhecer a evolução de outros parâmetros como a potência e o binário motor e as forças atuantes com o movimento. Adicionalmente foi realizada uma simulação do ciclo de condução NEDC que permite estimar o consumo energético, a partir do qual é calculado o impacto ambiental e a autonomia proporcionada pela bateria.

A aposta na conversão de um automóvel convencional em eléctrico é uma solução viável e que promove a redução das emissões de CO₂ deste sector, porém constitui ainda uma atividade não compensadora do ponto de vista económico.

ABSTRACT

The present dissertation aimed to explain the project of a battery with BMS for use in electric vehicle and contribute to better integration of electric vehicles, promoting the awareness of the need to more sustainable mobility with support in electricity face to the actual energetic panorama.

The work starts with the exposition of the state of the art about the evolution of electric vehicle with emphasis in the factors that lead to its hibernation, as well as the motivations that were in the origins of the returning and the different architectures that are actually being used. Then are expose the study of the vehicle kinematics with formulation of the forces which oppose to the movement, as well as the power, velocity and torque to overcome them. After different energy storage technologies are analyzed. From these ones are explored those that actually better obtain the requirements for use in electric mobility focusing more on electrochemical technology based in Lithium and its ongoing developments. This work also presents the functionalities to be implemented by a BMS for supervision of critical parameters and battery protection.

A vehicle has been chose and based on its specifications, the electrification of the power drive has been developed with the choice of real components. By the application of the kinematic theory were formulated differential equations that model the dynamic behavior of the vehicle. From these studies and the specifications found was designed a battery that would achieve the desired autonomy and designed a possible representation of the inner aspect and encapsulation. Based on the formulated modeling an application in MATLAB was developed for the simulation of vehicle behavior in different scenarios. This model allows us to infer the action of the mass variation and pavement slope of acceleration and instantaneous and maximum achievable velocity, as well as the distance traveled by the vehicle. It allows to make possible to know the evolution of other parameters such as power and torque motor and the forces acting on the movement. In addition, a simulation of the driving cycle NEDC it was made that allows to estimate the energetic consumption, from which the environmental impact and the autonomy provided by the battery can be calculated.

The investment in the transformation of a conventional vehicle to an electric is a viable solution and that promotes the reduction of CO₂ emissions from this sector, but it's not still a rewarding activity from an economic point of view.

PALAVRAS CHAVE

Veículo eléctrico
Armazenamento de energia
Células electroquímicas
Baterias de Íons de Lítio
BMS (*Battery Management System*)
Conversores de potência e motores eléctricos
Modelização cinemática e dinâmica

KEY WORDS

Electric Vehicle
Energy Storage
Electrochemical cells
Lithium ion battery
Battery Management System
Power converters and electric motors
Modeling kinematics and dynamics

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar aqui a minha profunda gratidão a todos os que contribuíram para a realização desta dissertação.

Ao meu orientador Professor Doutor Joaquim Delgado pela inteira disponibilidade e pelos valiosos contributos e correções realizadas ao longo deste trabalho, bem como pelo incentivo e a confiança inculcados.

Aos meus pais por tudo aquilo que me concederam ao longo destes anos, pelos inúmeros sacrifícios, por me aperfeiçoarem com cada palavra e pela paciência e dedicação cedidas na perseguição de mais um objectivo.

À Fundação Lapa do Lobo por me proporcionarem a oportunidade ímpar de prosseguir em mais uma etapa e pelo apoio incondicional e a confiança depositados nestes anos.

À senhora Teresa Cunha pelas suas palavras sábias e de encorajamento e pelo seu constante e inestimável apoio.

À minha irmã e ao meu irmão por todo o apoio prestado e pelos momentos de amizade e de ânimo vividos em conjunto.

A todos o meu sincero Muito Obrigada.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
ÍNDICE DE QUADROS	xxiii
ABREVIATURAS E SIGLAS	xxv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e objectivos	2
1.3 Organização do trabalho	2
2. Estado da arte na mobilidade eléctrica	5
2.1 Evolução histórica e a hibernação	5
2.2 O acordar.....	7
2.3 Arquiteturas	8
2.3.1 BEV	8
2.3.2 HEV e PHEV	9
3. Cinemática do veículo automóvel	13
3.1 Forças que se opõem ao movimento.....	13
3.1.1 Força de resistência ao rolamento	15
3.1.2 Força de resistência aerodinâmica.....	17
3.1.3 Força gravítica	19
3.1.4 Força de inércia	20
3.1.5 Força de resistência total	24
3.2 Outros parâmetros.....	24
3.2.1 Velocidade de rotação no motor.....	24
3.2.2 Potência mecânica a aplicar nas rodas.....	24
3.2.3 Potência eléctrica.....	25
3.2.4 Binário motor.....	25
4. Tecnologias de armazenamento de energia.....	27

4.1	Armazenamento de energia e sistemas de mobilidade.....	28
4.1.1	Tecnologias de armazenamento de energia	28
4.1.2	Requisitos do armazenamento de energia na mobilidade eléctrica.....	29
4.2	Funcionamento da bateria electroquímica.....	30
4.2.1	Parâmetros críticos	31
4.2.2	Tipo de encapsulamento.....	32
4.3	Tecnologias electroquímicas em uso na mobilidade eléctrica	33
4.3.1	Baterias à base de Níquel	33
4.3.2	Baterias à base de Lítio	33
4.3.3	O factor custo	35
4.3.4	Parâmetros relevantes das tecnologias electroquímicas.....	35
4.4	Tecnologias de continuidade e de ruptura.....	36
4.4.1	Aposta na melhoria da tecnologia com Iões de Lítio.....	37
4.4.2	Aposta no Lítio-ar	37
4.4.3	Supercondensadores.....	38
4.4.4	Aposta no Sulfureto de Lítio (Lítio Sulphur).....	38
4.4.5	Uma aposta híbrida	39
4.5	Questões práticas de projeto.....	39
5.	Sistemas de Gestão da Bateria	41
5.1	Monitorização das grandezas críticas na tecnologia electroquímica.....	41
5.1.1	Medição da tensão, corrente e temperatura.....	42
5.1.2	Proteção das células	44
5.1.3	Gestão térmica.....	46
5.1.4	Balanceamento das células (equalização da carga).....	47
5.1.5	Determinação dos estados da bateria	52
5.1.6	Comunicação.....	52
5.2	Arquiteturas dos sistemas e gestão da bateria	53
5.2.1	Topologia centralizada.....	53
5.2.2	Topologia modular	53
5.2.3	Topologia <i>master-slave</i>	53
5.2.4	Topologia distribuída	54
5.3	Questões práticas do projeto.....	55

6.	Projeto do sistema propulsor eléctrico do veículo escolhido	57
6.1	Especificações do veículo a electrificar	57
6.2	Modelização cinemática do veículo.....	59
6.3	Modelização da potência requerida	59
6.4	Modelização do consumo energético.....	60
6.4.1	Estimativa do consumo energético para uma dada autonomia.....	60
6.5	Seleção dos componentes a integrar o <i>Power Drive</i> eléctrico.....	61
6.5.1	Motor + Controlador.....	62
6.5.2	Sistema de refrigeração	64
6.5.3	Bomba de vácuo	65
6.5.4	Pedal de aceleração.....	67
6.5.5	Conversor DC-DC	67
6.6	Modelização do comportamento dinâmico do veículo	68
6.7	Diagrama eléctrico geral	72
7.	Projeto da bateria com BMS.....	75
7.1	Escolha do tipo de células para o projeto da bateria.....	75
7.2	Agrupamento de células.....	76
7.3	Escolha do carregador.....	78
7.4	Especificações técnicas da bateria	79
7.5	Escolha do BMS	84
7.5.1	Medição da tensão e da temperatura.....	85
7.5.2	Medição da corrente	87
7.5.3	Mostrador e gestor de parâmetros do veículo.....	88
7.6	Diagrama geral de ligações do BMS	89
8.	Simulação das condições dinâmicas do veículo.....	93
8.1	Simulação do comportamento dinâmico do veículo.....	94
8.1.1	Caso estudo 1 – Deslocamento no plano horizontal.....	94
8.1.2	Caso estudo 2 - Deslocamento num plano inclinado.....	96
8.1.3	Caso estudo 3 – Deslocamento com alteração da massa do veículo	98
8.1.4	Caso de estudo 4 – Deslocamento num plano inclinado com alteração da massa do veículo	99
8.2	Simulação do consumo energético e impacto ambiental	101

8.2.1	Análise dos parâmetros do ciclo de condução	101
8.2.2	Análise do consumo energético	103
8.2.3	Análise do impacto ambiental.....	106
8.2.4	Cálculo da autonomia com base no ciclo NEDC	107
9.	Custo de transformação do veículo	109
9.1	Estimativa de orçamento	109
10.	Conclusão e trabalhos futuros	111
	Referências.....	113
	Anexo 1	121
	Anexo 2.....	123
	Anexo 3.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Modelo de VE de Ferdinand Porsche [3].	6
Figura 2-2: Previsão das vendas anuais para BEV, PHEV e HEV [5].	8
Figura 2-3: Nissan Leaf 2015 [7].	9
Figura 2-4: BMW i3 RE 2015 [8].	10
Figura 2-5: Toyota Prius 2015 [9].	10
Figura 2-6: Arquitetura (a) BEV, (b) híbrida série e (c) híbrida paralela [10].	11
Figura 2-7: Arquitetura híbrida mista. Fonte: adaptada de [11].	11
Figura 2-8: Chevrolet Volt 2015 [12].	12
Figura 3-1: Representação das forças de tração e resistente. Fonte: adaptada de [13].	14
Figura 3-2: Distribuição da pressão na região de contacto da roda com o pavimento.	15
Figura 3-3: Deflexão do pneu e força de resistência ao rolamento. Fonte: adaptada de [14].	15
Figura 3-4: Velocidade do veículo oposta à velocidade do vento. Fonte: adaptada [16].	18
Figura 3-5: Coeficientes de resistência aerodinâmica de diferentes perfis.	18
Figura 3-6: Representação da força gravítica num veículo automóvel. Fonte: adaptada de [14].	19
Figura 3-7: Movimento de translação a), rotação b) e combinado c). Fonte: adaptada de [19].	20
Figura 4-1: Geração de electricidade por origem em Portugal em 2014 [21].	28
Figura 4-2: Funcionamento de uma célula electrolítica na carga (esquerda) e na descarga (direita) [24].	31
Figura 4-3: Célula cilíndrica (à esquerda) e prismática (à direita) [28] e [29].	33
Figura 4-4: Características das tecnologias de iões de Lítio utilizadas na mobilidade eléctrica. Fonte: adaptada de [33].	34
Figura 4-5: Previsão da evolução do custo das baterias em \$/kWh [35].	35
Figura 4-6: Densidades de energia <i>versus</i> custos por célula para diversas tecnologias [37].	37
Figura 4-7: Densidade de energia para diferentes tecnologias de armazenamento [40].	38
Figura 5-1: Medição da temperatura e tensão com <i>cell boards</i> . Fonte: adaptada de [46].	42
Figura 5-2: Medição da tensão (a) por célula ou (b) para um grupo de células.	43
Figura 5-3: Medição da corrente com (a) sensor de efeito Hall e (b) resistência calibrada (b).	43
Figura 5-4: SOA típica da tensão e temperatura de uma célula de iões de Lítio em função da corrente de carga e de descarga. Fonte: adaptada de [25].	44
Figura 5-5: Monitorização e controlo da SOA das células na carga e na descarga.	45
Figura 5-6: CCL baseado na tensão (a) e temperatura (b) de uma célula e na corrente de descarga da bateria (c). Fonte: adaptada de [25].	45
Figura 5-7: DCL baseado na tensão (a) e temperatura (b) de uma célula e na corrente de descarga da bateria (c). Fonte: adaptada de [25].	46

Figura 5-8: Valor médio de tensão da célula de maior tensão. Fonte: adaptada de [25].	46
Figura 5-9: Sistema de gestão térmica.	47
Figura 5-10: Estado da capacidade de um <i>pack</i> de células na (a) carga e na (b) descarga plena. Fonte: adaptada de [49].	48
Figura 5-11: Métodos de balanceamento passivo e ativo.	49
Figura 5-12: Circuito típico de um equalizador resistivo [49].	49
Figura 5-13: Circuito típico de um equalizador capacitivo de (a) um condensador ou de (b) múltiplos condensadores [49].	50
Figura 5-14: Circuito típico de um equalizador indutivo (a) com um indutor ou (b) com múltiplos indutores (b) [49].	51
Figura 5-15: Circuito típico de um equalizador indutivo de (a) um indutor ou (b) de múltiplos indutores [49].	52
Figura 5-16: Topologia (a) centralizada, (b) modular, (c) <i>master-slave</i> e (d) distribuída.	54
Figura 6-1: Honda <i>Civic Coupé EX</i> de 1996.	58
Figura 6-2: Diagrama do <i>Power Drive</i> eléctrico do veículo.	61
Figura 6-3: Motor <i>Curtis</i> 1238-7601 <i>HPEVS</i> [54].	63
Figura 6-4: Controlador <i>Curtis</i> 1238-7601 <i>HPEVS</i> [56].	63
Figura 6-5: Montagem do conjunto motor e controlador <i>Curtis</i> [57].	64
Figura 6-6: Placa de refrigeração líquida da <i>Curtis</i> [58].	64
Figura 6-7: Sistema de refrigeração do controlador do veículo eléctrico.	64
Figura 6-8: <i>Kit</i> de refrigeração <i>EV West</i> com ventilação forçada [59].	65
Figura 6-9: Termóstato da <i>EV West</i> [60].	65
Figura 6-10: Bomba de vácuo <i>SSBC</i> (à esquerda) e <i>switch</i> (à direita) [61].	66
Figura 6-11: Sistema de travagem do veículo eléctrico. Fonte: adaptada de [62].	66
Figura 6-12: Transdutor de pressão de travão da <i>EV West</i> [63].	66
Figura 6-13: Pedal de aceleração com potenciómetro <i>Evnetics Billet</i> [64].	67
Figura 6-14: Conversor <i>Elcon TCD High Efficiency Series DC/DC</i> [65].	67
Figura 6-15: Linearização por intervalos da curva de binário [54].	68
Figura 6-16: Linearização por intervalos da curva de binário em r.p.m. e N.m.	69
Figura 6-17: Diagrama geral do <i>Power Drive</i> eléctrico.	74
Figura 7-1: Célula <i>Panasonic NCR18650B</i> [66].	75
Figura 7-2: Especificações do <i>Power Drive</i> eléctrico utilizadas no projeto da bateria.	76
Figura 7-3: Esquema de ligações das células da bateria.	78
Figura 7-4: Carregador AC-DC <i>Elcon PFC2500</i> [67].	78
Figura 7-5: Matriz de agrupamento de células (a) vista de topo e (b) vista de baixo.	80
Figura 7-6: Vista lateral do agrupamento de células.	80
Figura 7-7: Agrupamento de células num <i>pack</i> visto de topo.	80
Figura 7-8: Exemplo de montagem das células em matriz de suportes [68].	81
Figura 7-9: Desenho tridimensional de um <i>pack</i> .	81
Figura 7-10: Agrupamento dos <i>packs</i> da bateria.	82
Figura 7-11: Possível agrupamento dos <i>packs</i> no volume da bateria.	83

Figura 7-12: Possível aspecto exterior da bateria com encapsulamento e sistema de ventilação.	83
Figura 7-13: <i>Lithiumate Pro</i> BMS Master - Ref. ^a 2CN0000E da <i>Elithion</i> [69].....	84
Figura 7-14: Ligação das <i>cell boards</i> em cada <i>pack</i> da bateria.....	86
Figura 7-15: Ligação das <i>cell boards</i> ao BMS.....	86
Figura 7-16: <i>Cell boards</i> do tipo (a) <i>positive end</i> , (b) <i>mid bank</i> e (c) <i>negative end</i> [74].....	87
Figura 7-17: Sensor de efeito de <i>Hall Tamura</i> – Ref. ^a 2CS0XX0K [75].....	87
Figura 7-18: Instalação dos sensores de corrente.....	88
Figura 7-19: <i>Display</i> 6DS0020P [77].....	89
Figura 7-20: Digrama de ligações ao BMS.....	91
Figura 8-1: Aceleração instantânea e máxima velocidade alcançável.....	94
Figura 8-2: Curva do binário motor e da potência <i>versus</i> velocidade de rotação em r.p.m.	95
Figura 8-3: Distância percorrida pelo veículo (em metros) em função do tempo.....	95
Figura 8-4: Força útil, que é a diferença entre a força motora e a força de atrito.....	96
Figura 8-5: Variação da aceleração instantânea para diferentes declives.....	96
Figura 8-6: Variação da velocidade máxima atingível para diferentes declives.....	97
Figura 8-7: Variação da distância percorrida para diferentes declives.....	97
Figura 8-8: Variação da aceleração instantânea para diferentes massas ou número de ocupantes.....	98
Figura 8-9: Variação da velocidade máxima alcançável para diferentes massas ou número de ocupantes.....	98
Figura 8-10: Variação da distância percorrida para diferentes massas ou número de ocupantes.....	99
Figura 8-11: Variação da aceleração instantânea para diferentes declives e diferentes massas.....	99
Figura 8-12: Velocidade alcançável para diferentes declives e massas.....	100
Figura 8-13: Variação da distância percorrida para diferentes declives e diferentes massas.....	100
Figura 8-14: Principais componentes do <i>Power Drive</i>	101
Figura 8-15: Novo ciclo de condução europeu (NEDC).....	102
Figura 8-16: Evolução da aceleração instantânea.....	102
Figura 8-17: Evolução da distância percorrida em função do tempo.....	103
Figura 8-18: Evolução do somatório das forças resistentes e velocidade ao longo do tempo.....	103
Figura 8-19: Potência mecânica fornecida às rodas em função do tempo.....	104
Figura 8-20: Evolução das potências.....	104
Figura 8-21: Evolução da energia consumida e regenerada.....	105
Figura 8-22: Evolução da energia consumida acumulada em função do tempo <i>versus</i> velocidade.....	105

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1: Coeficiente de resistência ao rolamento.....	17
Quadro 3-2: Coeficiente de resistência aerodinâmica para diversos veículos eléctricos e híbridos.	19
Quadro 4-1: Características das baterias em uso na mobilidade eléctrica.....	36
Quadro 6-1: Especificações técnicas do Honda <i>Civic Coupé EX</i>	58
Quadro 6-2: Principais características dos motores estudados [51], [52], [53] e [54].	62
Quadro 6-3: Principais características do motor + controlador Curtis 1238-7601 [54] e [56].	63
Quadro 6-4: Características do conversor <i>Elcon</i> TCD DC/DC [65].	67
Quadro 7-1: Especificações técnicas da célula <i>Panasonic</i> NCR18650B.....	76
Quadro 7-2: Especificações técnicas do carregador AC-DC <i>Elcon</i> PFC2500.....	79
Quadro 7-3: Característica de um <i>pack</i>	82
Quadro 7-4: Características da bateria projetada.....	84
Quadro 7-5: Funções dos leds [71].....	85
Quadro 7-6: Especificações técnicas dos sensores de efeito de <i>Hall</i> – Ref. ^a 2CS0XX0K [76].	88
Quadro 7-7: Especificações técnicas do <i>display</i> 6DS0020P [77].....	89
Quadro 9-1: Estimativa do orçamento para conversão do veículo em eléctrico.	110

ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternating Current (Corrente Alternada)
APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
BEV	Battery Electric Vehicle (Veículo eléctrico puro)
BMS	Battery Management System (Sistema de gestão de bateria)
CAN	Controller Area Network
CCL	Charge Current Limit (Limite de corrente de carga)
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
DCL	Discharge Current Limit (Limite de corrente de descarga)
DoD	Depth of Discharge
ECE	European Driving Cycle (Ciclo de condução Europeu)
EDP	Electricidade de Portugal
EUDC	Extra Urban Driving Cycle (Ciclo de condução extra urbano)
GPL	Gás Petróleo Liquefeito
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HLIM	High Limit
IBM	International Business Machines
IC	Integrated Circuit (Circuito integrado)
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LLIM	Low Limit
MCI	Motor de combustão interna
NEDC	New European Driving Cycle (Novo ciclo de condução europeu)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
RJ	Registered Jack
RS	Recommended Standard
S.I.	Sistema Internacional de Unidades
SOA	Safe Operating Area
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
USB	Universal Serial Bus (Porta Universal)
VE	Veículo eléctrico

A presente dissertação encontra-se redigida de acordo com o novo acordo ortográfico.

1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se um a perspectiva geral do contexto em que se insere esta dissertação, enunciam-se os seus objectivos e as motivações que estiveram na sua génese e por fim uma breve descrição dos temas abordados em cada capítulo em que esta se estrutura.

1.1 Enquadramento

O sistema energético tem vindo a mudar de uma base maioritariamente assente nos hidrocarbonetos para uma solução crescentemente descarbonizada e assente na produção de eletricidade de origem renovável. A par desta mudança tem também vindo a manifestar-se um interesse crescente pela mobilidade eléctrica, motivada pelo agravamento das alterações climáticas e a consciência da escassez dos recursos de origem fóssil, repercutindo-se no aumento do seu custo.

Com esta nova ordem emergente foi imposta uma procura de alternativas tecnológicas que suportassem uma maior capacidade de armazenamento de energia. Apesar de essas constituírem ainda um obstáculo à mais rápida proliferação das energias renováveis e da mobilidade eléctrica, têm vindo a ser continuamente melhoradas com notáveis progressos ao nível da segurança, robustez, durabilidade e eficiência. Atualmente podem ser já encontradas uma oferta diversificada que atende cada vez mais às necessidades das aplicações, à medida que as tecnologias amadurecem. Para o sector da mobilidade eléctrica o mercado é mais restrito, devido às exigências que são colocadas para com esta aplicação, resumindo-se praticamente às baterias electroquímicas à base de Lítio. Estas permitem já alcançar performances dinâmicas muito próximas às da tecnologia de combustão e estão disponíveis a custos comedidos, proporcionadas por economias de escala resultantes de grandes volumes de produção. Esta estratégia é adoptada atualmente pela Tesla que utiliza um grande número de

pequenas células cilíndricas em oposição à dos restantes fabricantes que recorrem a células prismáticas de elevada capacidade, mas com preço por kWh muito superior.

1.2 Motivação e objectivos

Esta dissertação surge com o intuito de disseminar conhecimento sobre a aposta nos veículos eléctricos como alternativa viável à descarbonização e sustentabilidade do sector da mobilidade, que é hoje indissociável das emissões de CO₂. Na introdução deste novo paradigma o armazenamento de energia assume um papel cada vez mais importante para uma mais rápida penetração da mobilidade eléctrica como parte de uma solução futura, para a integração de mais energia renovável.

O principal objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma bateria com BMS para uso num veículo eléctrico e pretende-se:

- Electrificação do sistema propulsor de um veículo compacto convencional;
- Projeto de um sistema de armazenamento de energia com uma bateria, um BMS e um carregador a bordo;
- Conceber uma estrutura para ao alojamento da bateria com ventilação forçada;
- Desenvolvimento de uma aplicação em MATLAB para a simulação das condições dinâmicas do veículo em diferentes cenários;
- Estudo do consumo energético, do impacto ambiental e da autonomia alcançada com base no ciclo de condução NEDC;
- Disseminar o conhecimento sobre o funcionamento e desempenho do veículo;
- Exposição das funcionalidades implementadas por um BMS para a proteção e controlo da bateria;
- Sensibilizar para a importância do sistema de armazenamento de energia na mobilidade eléctrica;
- Promover a mobilidade mais sustentável.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação está estruturada em 10 capítulos e 3 anexos. Neste primeiro é realizado um enquadramento ao tema e expostos os objectivos a atingir.

No **capítulo 2** é apresentada uma breve revisão sobre a evolução histórica do veículo eléctrico e das arquiteturas em que atualmente se comercializa.

No **capítulo 3** é realizado o estudo cinemático do veículo com a formulação das equações necessárias para o cálculo das forças que se opõem ao movimento, bem como dos parâmetros de potência (mecânica e eléctrica), velocidade e binário motor.

No **capítulo 4** são estudadas as tecnologias de armazenamento de energia com ênfase na tecnologia electroquímica com baterias de Lítio e dos parâmetros a cumprir para a sua operação segura. São também exploradas as tecnologias em desenvolvimento, com exemplos de apostas promissoras em baterias à base de Lítio e supercondensadores para uso na mobilidade eléctrica.

No **capítulo 5** são expostos os diversos mecanismos (de medição, proteção e gestão térmica) que um BMS deve possuir para a monitorização e controlo dos parâmetros críticos da bateria dentro de uma região de operação segura, assim como as topologias em que se suporta para uma distribuição uniforme da carga.

No **capítulo 6** são apresentados os componentes escolhidos que constituem o sistema propulsor do veículo, bem como a modelização da potência requerida e do consumo energético para uma dada autonomia. Com base no estudo cinemático são formuladas as equações diferenciais que modelizam o comportamento dinâmico e para concluir exibe-se um diagrama de ligações do *power drive* eléctrico, com uma descrição do seu funcionamento.

No **capítulo 7** é desenvolvido o projeto da bateria com BMS para a alimentação do sistema propulsor do veículo, assim como o desenho do corpo da bateria e do encapsulamento com as suas especificações técnicas. Neste é ainda apresentado um esquema de ligação do BMS ao *power drive* eléctrico e à instrumentação de supervisão dos parâmetros críticos da bateria, onde é feita uma descrição do seu funcionamento.

No **capítulo 8** expõem-se as simulações para diferentes cenários com a alteração das condições dinâmicas do veículo, a partir da formulação das equações diferenciais. Com base no ciclo de condução NEDC é estimado ainda o consumo energético e o impacto ambiental, bem como a autonomia proporcionada pela bateria projetada.

No **capítulo 9** apresenta-se uma estimativa do custo global de conversão do veículo em eléctrico.

No **capítulo 10** estão as conclusões gerais do trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros.

Nos anexos 1 a 3 constam as especificações técnicas de alguns dos componentes utilizados para o projeto da bateria, o esquema de montagem do *power drive* eléctrico do veículo e o código das simulações implementadas em MATLAB.

2. Estado da arte na mobilidade eléctrica

Neste capítulo apresenta-se uma abordagem generalizada sobre a evolução histórica do veículo eléctrico e das razões que conduziram ao seu ressurgimento, depois de quase um século em hibernação, assim como dos factores que têm retardado a sua penetração.

2.1 Evolução histórica e a hibernação

O automóvel eléctrico remonta a meados do século XIX com a invenção da bateria, do gerador e do motor eléctrico, ocorridos durante o início deste século, tendo-se assim proporcionado as condições para que fossem criados os primeiros veículos (VE) com um sistema propulsor eléctrico.

Em 1834 Thomas Davenport concebeu o primeiro motor eléctrico DC que instalou num pequeno veículo que se movia numa pista circular electrificada. A invenção do motor eléctrico teve como base os trabalhos desenvolvidos por outros nomes como, Anyos Jedlik e Joseph Henry, mas foi Thomas Davenport a conseguir o registo da primeira patente para um motor eléctrico em 1937. Entre 1937 e 1841 o químico Robert Davidson produziu a primeira frota de carros eléctricos alimentados por células galvânicas, que rapidamente foi destruída por representar uma potencial ameaça à subsistência do sector ferroviário, apesar de a bateria custar cerca de 40 vezes mais que o equivalente em carvão para percorrer a mesma distância. No ano de 1884 em Londres Thomas Parker constrói o primeiro utilitário de um veículo eléctrico de quatro rodas, com uma estrutura que se assemelhavam a um veículo de tração animal. O motor eléctrico era alimentado por baterias recarregáveis de alta capacidades que este mesmo projetou.

Embora limitados à tecnologia da época, estas máquinas já ostentavam uma performance e engenho que ainda hoje nos fascinam. Para promover o potencial que esta tecnologia

ambicionava, em 1899 numa exibição que disputava um record de velocidade, o “*La Jamais Contente*”, projetado pelo engenheiro Camille Jénatzy, bate a barreira dos 100 km/h. Em 1900, Ferdinand Porsche apresentava o primeiro veículo híbrido série, com um *design* visionário que permitia já uma autonomia de 64 km (Figura 2-1). Este integrava dois motores nas rodas dianteiras, alimentados por um gerador que era acionado por um MCI (secção 2.3.2) [1] [2].



Figura 2-1: Modelo de VE de Ferdinand Porsche [3].

A tecnologia da bateria electroquímica foi, desde início, uma condicionante para os VE, dada à escassa autonomia proporcionada. Também em 1900, o pioneiro Waldmar Jungner viria a desenvolver a bateria de Níquel-Cádmio, tendo atingido uma autonomia de 150 km [4]. Em 1901, Thomas Edison concebeu a primeira bateria recarregável de níquel-ferro, tendo conseguido obter uma capacidade de armazenamento que superava em 40% a capacidade da bateria de chumbo-ácido num menor tempo de recarga. No final do século os VE dominavam o mercado automóvel e em 1912 atingiram o pico de produção com registo de mais 38.000 veículos. Neste período destaca-se o início da produção do Detroit Electric, um veículo seguro, de baixo ruído, vibração, manutenção e elevada fiabilidade, que só entre 1907 e 1939 comercializou 13.000 unidades.

Apesar destes progressos a descoberta do motor de combustão interna (MCI) viria a conduzir o VE a um período de declínio, incapaz de competir com a autonomia proporcionada pela tecnologia de combustão. A descoberta de reservas de petróleo em abundância; a invenção do motor de arranque, eliminando o uso de uma manivela manual para o acionamento do MCI; a necessidade de percorrer distâncias cada vez maiores; a escassez de postos de abastecimento eléctricos e o início de uma grande produção em massa do Ford Model T permitindo a sua comercialização a preços competitivo, conduziram o VE a um período de hibernação por quase um século.

2.2 O acordar

Com o agravamento das alterações climáticas e o aumento contínuo do preço do barril de petróleo, como consequência da crescente dificuldade na exploração deste recurso e da sua esgotabilidade à qual o sector petrolífero tem sucumbido, propiciou o regresso da mobilidade eléctrica com o híbrido (HEV). Este veículo surge como alternativa à baixa autonomia proporcionada pelos veículos eléctricos puros (BEV) e à falta de infra-estruturas de energia eléctrica que permitissem a recarga das baterias.

A necessidade de uma alternativa para uma mobilidade sustentável foi ponderada desde muito cedo, após os choques petrolíferos ocorridos em 1973 e 1979, contudo nem o VE nem o HEV estavam ao nível das exigências do mercado automóvel convencional. Antes do primeiro choque petrolífero o custo do crude era de apenas \$2 (dois dólares) por barril, tendo inviabilizado a possibilidade de estas tecnologias progredirem.

A introdução do veículo eléctrico no mercado automóvel ocorre com o lançamento de modelos como o Impact EV1 (1996) da GM, o Toyota RAV4 (1997), o Honda Insight e o Toyota Prius (1999) e mais tarde, o Nissan Leaf e o Chevrolet Volt (2011) da GM oferecendo já uma alternativa com uma autonomia considerável e comercialmente viável ao veículo a combustão. Este movimento potenciou que outras soluções emergissem, caso de marcas como a Tesla, a Fisker, a Exagon, a BYD e a Rimac que vieram impor uma dinâmica à qual o mercado automóvel teve de reagir. Estes novos fabricantes não seguem as políticas de mercado que definem o sector da mobilidade convencional com o sector petrolífero, tendo como objectivo a concepção de soluções alternativas que possam competir em autonomia, performance, aerodinâmica e *design* com o veículo a combustão. As maiores revelações nesta mudança de paradigma, ainda em curso na mobilidade, foram o Tesla Roadster à venda desde 2006 com uma autonomia de 350 km e em 2009 o Tesla Model S podendo percorrer até 426 km. Estes vieram provar que a aposta em veículos eléctricos era já uma parte de uma solução futura. Com efeito, não existe hoje um fabricante instalado que não inclua na sua oferta produtos de mobilidade eléctrica. Recentemente, a Tesla anunciou a disponibilidade da toda a sua tecnologia patenteada, com o intuito de estimular a competitividade entre os fabricantes por forma a acelerar a proliferação dos veículos eléctricos [1] [2] [4].

Uma projecção divulgada em 2013 pela *Navigant Research* (Figura 2-2) previa um aumento de veículos híbridos de 4% até ao final do ano de 2020 e de veículos de arquitetura *plug-in* (PEV) de 3 milhões de unidades por ano, o que representa cerca de 3% do mercado global de veículos ligeiros. A diminuição generalizada do preço dos VEs proporcionada com a produção em escala e a atribuição de incentivos fiscais potenciam este cenário [5].

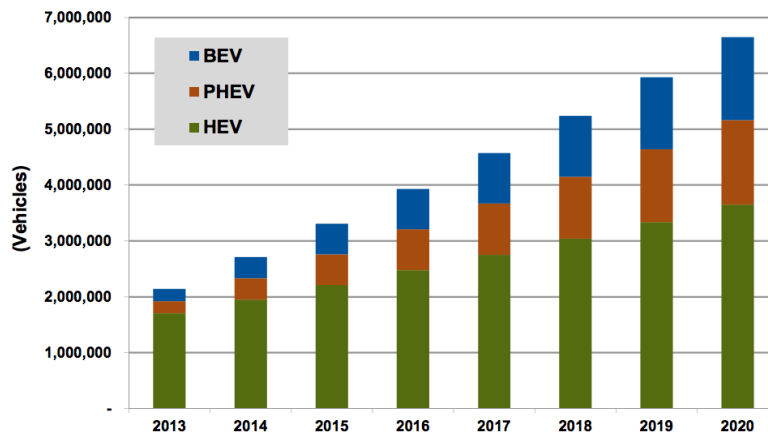


Figura 2-2: Previsão das vendas anuais para BEV, PHEV e HEV [5].

2.3 Arquiteturas

Os veículos eléctricos atualmente comercializados podem ser agrupados em função da constituição do sistema propulsor, podendo ser de tração eléctrica total ou parcial, como a seguir se apresentam [6]:

- BEV (*Battery Electric Vehicle*) – Veículo eléctrico puro;
- HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) – Veículo eléctrico híbrido;
- PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) – Veículo eléctrico híbrido dotado de entrada eléctrica para a recarga das baterias a partir da rede eléctrica.

2.3.1 BEV

O BEV é um veículo totalmente eléctrico, alimentado por baterias instaladas a bordo, que podem ser recarregadas a partir de um posto de abastecimento ligado à rede eléctrica ou complementado pelo sistema de recarga por regeneração (Figura 2-6.a). Este exhibe uma elevada eficiência energética e baixa emissão de CO₂ durante a utilização, além disso, como as transferências de energia ocorrem maioritariamente em cabos eléctricos, em detrimento das ligações mecânicas, beneficiam de menores perdas. Contudo, a autonomia proporcionada pelas baterias, o seu elevado custo e o tempo de recarga tornam esta tecnologia pouco atrativa, ainda assim os avanços tecnológicos têm sido promissores graças à tecnologia à base de Lítio.

O veículo Nissan Leaf, apresentado na Figura 2-3 é um exemplo com esta topologia.



Figura 2-3: Nissan Leaf 2015 [7].

2.3.2 HEV e PHEV

O veículo híbrido integra um sistema que combina um motor de combustão interna (MCI) com um sistema de propulsão eléctrico. A energia para a tração do veículo provém de duas fontes, dispondo a bordo de um banco de baterias e de um outro combustível para a alimentação do MCI, como a gasolina, o *diesel* e mais recentemente o GPL. Esta configuração tem como objectivo suprimir a baixa autonomia proporcionada pelas baterias, conjugada com a performance dinâmica e a eficiência energética de um BEV. Esta característica permite a redução significativa da dependência do uso de combustíveis fósseis, utilizados para a alimentação do motor de combustão, refletindo-se na diminuição das emissões de CO₂.

Existem várias abordagens quanto ao contributo das duas fontes de potência no sistema de tração. É, no entanto, comum agrupá-las em duas arquiteturas; a híbrida série e a híbrida paralela. Existe também atualmente a arquitetura híbrida mista, que combina simultaneamente as duas arquiteturas anteriores, por forma a proporcionar maior flexibilidade e eficiência.

Arquitetura híbrida série

Na arquitetura híbrida série, a energia mecânica proveniente do MCI é convertida a bordo em energia eléctrica num gerador, podendo ser usada para a recarga da bateria ou para a propulsão do veículo através de um motor eléctrico que está acoplado ao sistema de transmissão (Figura 2-6.b). O veículo pode ser traccionado com energia proveniente da bateria, do conjunto motor/gerador, ou pela combinação de ambos, não existindo acoplamento direto do MCI ao sistema de transmissão. Quando a bateria está abaixo um determinado estado de carga ou para velocidades elevadas o MCI assiste a propulsão do veículo. Se a potência aplicada pelo MCI for superior à necessária para a tração do veículo, o excedente é armazenado na bateria. A bateria também pode ser recarregada por travagem regenerativa, onde o motor eléctrico é utilizado como gerador.

Como exemplo de veículo que adopta esta arquitetura têm-se o híbrido BMW i3 com *range extender* apresentado na Figura 2-4



Figura 2-4: BMW i3 RE 2015 [8].

Arquitetura híbrida paralela

Na arquitetura híbrida paralela o veículo é traccionado por duas unidades de potência acopladas ao mesmo veio de transmissão, um MCI principal que aciona o sistema de propulsão e um motor eléctrico que auxilia a tração do veículo, suprimindo a falta de binário do MCI em baixos regimes de velocidade (Figura 2-6.c). O motor eléctrico pode traccionar o veículo com energia proveniente da bateria a baixas velocidades e funcionar também como gerador na travagem regenerativa ou quando a potência fornecida pelo MCI é superior à requerida para a propulsão do veículo, permitindo a recarga da bateria.

O Toyota Prius apresentado na Figura 2-5 constitui um veículo com esta arquitetura.



Figura 2-5: Toyota Prius 2015 [9].

A Figura 2-6 exhibe as diferentes topologias de arquiteturas atrás referidas.

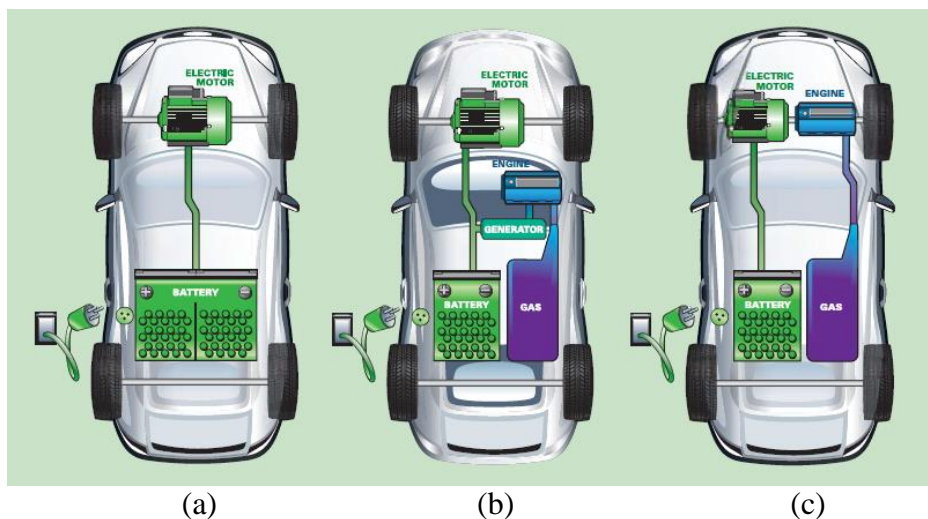


Figura 2-6: Arquitetura (a) BEV, (b) híbrida série e (c) híbrida paralela [10].

Arquitetura híbrida mista

A arquitetura híbrida mista integra no mesmo sistema propulsor a arquitetura híbrida paralela e a híbrida série, podendo funcionar em ambos os modos (Figura 2-7). Esta configuração confere-lhe a possibilidade de alternar entre uma maior potência e uma maior eficiência em diferentes situações, contudo revela-se mais complexa e dispendiosa. A baixas velocidades o veículo comporta-se como um BEV, o motor eléctrico fornece potência às rodas com energia proveniente da bateria. Em acelerações o motor/gerador entra em funcionamento, transmitindo o binário extra exigido pelo sistema de tração através de um único veio de transmissão a que está acoplado o motor eléctrico. Estes podem ser alimentados a partir do MCI, da bateria ou por ambos. A velocidade constante, o MCI aciona um motor/gerador que fornece energia ao motor eléctrico, podendo ser utilizada para a recarga da bateria.

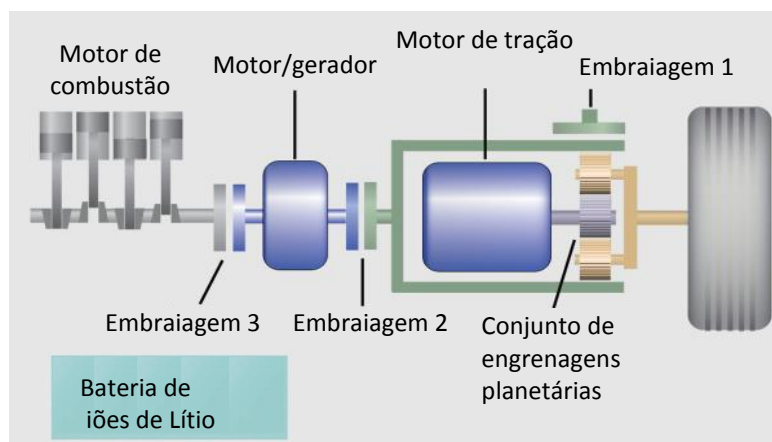


Figura 2-7: Arquitetura híbrida mista. Fonte: adaptada de [11].

Os veículos Chevrolet Volt, ilustrado na Figura 2-8, e o Opel Ampera constituem dois exemplos onde é aplicada uma arquitetura híbrida mista.



Figura 2-8: Chevrolet Volt 2015 [12].

Esta arquitetura é conhecida por *Voltec* e é atualmente fabricada pela General Motors.

3. Cinemática do veículo automóvel

O movimento de um veículo rege-se pela segunda Lei de Newton que enuncia que quando aplicada uma força (F) este fica sujeito a uma aceleração (a) que é inversamente proporcional à sua massa (m), dada pela equação (3-1).

$$a = \frac{F}{m} \quad (3-1)$$

onde,

a → Aceleração adquirida pelo corpo (m/s^2);

F → Força aplicada (N);

m → Massa do corpo (kg).

Quando em movimento há forças de atrito que interagem com o veículo modificando a intensidade da força resultante F aplicada e conseqüentemente a aceleração.

3.1 Forças que se opõem ao movimento

As forças que interferem com o movimento são devidas ao atrito das rodas com o solo, à resistência com o ar, ao peso e à inércia. A sua soma permite conhecer a força resistente F_R que o sistema propulsor deve aplicar para que o veículo se desloque com uma velocidade uniforme.

$$F_R = F_r + F_D + F_g + F_i \quad (3-2)$$

onde,

- F_R → Somatório das forças resistentes (N);
- F_r → Força de resistência ao rolamento (N);
- F_a → Força de resistência aerodinâmica (N);
- F_g → Força gravítica (N);
- F_i → Força de inércia (N).

Considerando F_m a força motora desenvolvida pelo sistema propulsor, é possível determinar a força propulsora, F_p , e conhecer o comportamento do veículo, através da equação (3-3). Se F_m for igual a F_R , F_p é nula e o veículo desloca-se com velocidade constante. Quando F_p é positiva o veículo adquire aceleração e desacelera se F_p for negativa.

$$F_p = F_m - F_R \quad (3-3)$$

onde,

- F_p → Força propulsora (N);
- F_m → Força motora desenvolvida pelo sistema propulsor (N);
- F_R → Somatório das forças resistentes (N).

Na Figura 3-1 ilustram-se as forças que atuam num veículo em movimento.

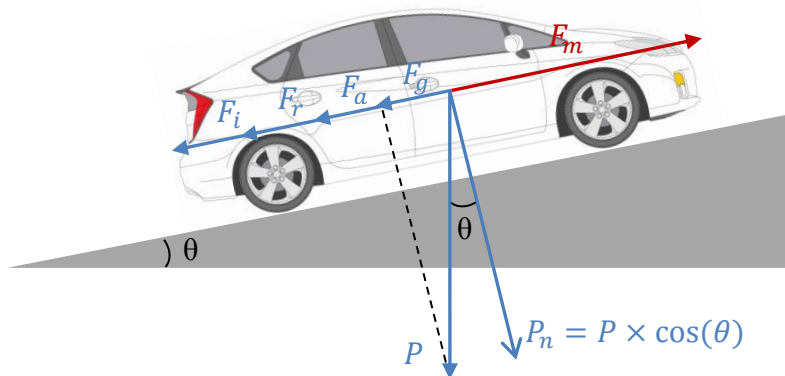


Figura 3-1: Representação das forças de tração e resistente. Fonte: adaptada de [13].

Para a modelização matemática do comportamento dinâmico de um veículo é necessário conhecer as equações matemáticas que regem a ação das forças que atuam sobre ele, expostas nas secções seguintes.

3.1.1 Força de resistência ao rolamento

A força de resistência ao rolamento deve-se à fricção dos pneus do veículo com o pavimento e depende essencialmente da rugosidade do piso, do tipo de pneu e do peso exercido em cada roda.

Em consequência da elasticidade do pneu, a ação do peso cria uma deformação na parte inferior, resultante da força de reação do pavimento (Figura 3-2), refletindo-se no aumento da área de contacto e da resistência ao rolamento. Quando o veículo se encontra imobilizado as forças de reação distribuem-se simetricamente pela secção plana resultante da deformação e a força de reação P_z surge na mesma direcção, mas com sentido contrário à força P .

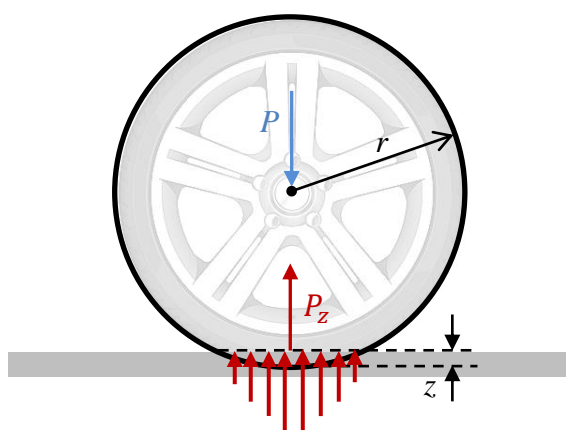


Figura 3-2: Distribuição da pressão na região de contacto da roda com o pavimento.

Fonte: adaptada de [14].

Contudo, quando a roda está em movimento, a força P_z desloca-se do eixo vertical no sentido do deslocamento (Figura 3-3), originando o binário resistente T_r que se opõe ao movimento de rotação imposto pelo binário motor T'_r .

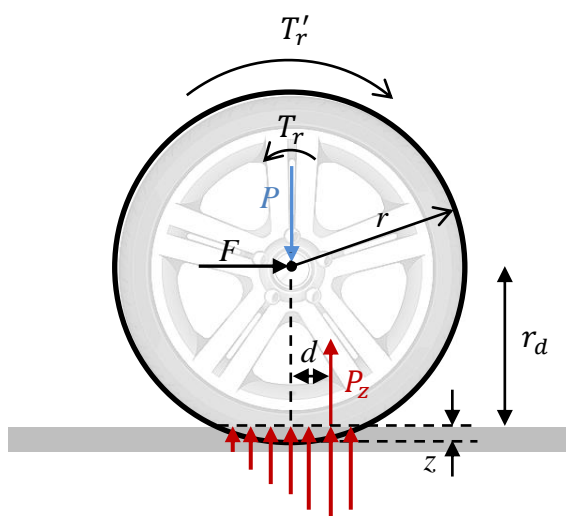


Figura 3-3: Deflexão do pneu e força de resistência ao rolamento. Fonte: adaptada de [14].

A ação do binário resistente T_r é tanto maior quanto maior a deformação e a distância d (Figura 3-3) e é dada pela equação (3-4) [15].

$$T_r = P_z \times d \quad (3-4)$$

onde,

T_r → Momento resistente ao rolamento (N.m);

P_z → Força de oposição resultante da reação do pavimento (N);

d → Distância da normal do piso com o centro da roda ao ponto de atuação da força de reação (m).

A perda da forma circular do pneu na região de contacto com o solo depende fortemente da pressão interna e da histerese dos materiais que o constituem. Nos sistemas ferroviários esta deformação é desprezível porque tanto a roda como o pavimento são em aço e a distância d tende para zero. Daí que a resistência ao rolamento seja mínima (ver Quadro 3-1).

Como se depreende da Figura 3-3, para que a roda se mantenha com velocidade uniforme é necessário aplicar uma força motora F capaz de compensar a ação da força de oposição P_z . Esta força pode ser obtida a partir da equação (3-5).

$$F = \frac{T_r}{r_d} = \frac{P_z \times d}{r_d} = P_z \times f_r \quad (3-5)$$

onde,

r_d → Raio efectivo do pneu (m);

$f_r = \frac{d}{r_d}$ → Coeficiente de resistência ao rolamento.

Analogamente é possível traduzir a resistência ao rolamento segundo uma componente linear, obtendo-se a força de resistência ao rolamento. Esta atua no eixo da roda e opõe-se ao movimento, sendo expressa pela equação (3-6).

$$F_r = P \times f_r \quad (3-6)$$

onde,

F_r → Força de resistência ao rolamento (N);

P → Peso aplicado no centro da roda (N).

Num veículo automóvel esta força é a soma das forças de resistência de cada roda, de acordo com a equação (3-6). Note-se que o peso do veículo mais o do condutor pode não se encontrar uniformemente distribuída pelas quatro rodas.

Em superfícies inclinadas F_r depende do ângulo formado pelo plano de deslocamento com a horizontal, tal como indicado na equação (3-7).

$$F_r = P \times f_r \times \cos(\theta) \quad (3-7)$$

onde,

$\theta \rightarrow$ Ângulo de inclinação do plano do deslocamento com a horizontal.

No Quadro 3-1 expõem-se os valores de coeficiente de resistência de rolamento obtidos para diferentes tipos de rodas, pneus e piso.

Quadro 3-1: Coeficiente de resistência ao rolamento.

Tipos de rodas/pneus	Tipo de piso	Valor de f_r
Roda de metal	Carris de metal	0,0002 a 0,001
Pneus de baixa resistência	Pista de autódromo	0,006 a 0,009
Pneus de automóvel	Piso de betão	0,01 a 0,015
	Piso de alcatrão	0,03
	Piso de areia sólida	0,04 a 0,08
	Piso com areia solta	0,2 a 0,4

Fonte: “Rolling Resistance Coefficient” (http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html).

3.1.2 Força de resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica deve-se ao atrito do veículo quando se desloca através do ar. Esta é função da densidade do ar, da área frontal, da sua forma e da velocidade de deslocamento relativamente ao ar, de acordo com a equação (3-8).

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_D \times (v - v_w)^2 \quad (3-8)$$

onde,

$F_D \rightarrow$ Força de resistência aerodinâmica (N);

$\rho \rightarrow$ Densidade do ar (kg/m^3);

$A_f \rightarrow$ Área frontal do veículo (m^2);

$C_D \rightarrow$ Coeficiente de arrasto ou de resistência aerodinâmica;

$v \rightarrow$ Velocidade do veículo (m/s);

$v_w \rightarrow$ Velocidade do vento medida no referencial de deslocação do veículo (m/s).

A densidade do ar depende da temperatura ambiente e da pressão atmosférica local e é dada pela equação (3-9). Tipicamente é adoptado o valor de $1,2 \text{ kg/m}^3$ à temperatura de 20°C e pressão atmosférica de 1 Atm ou de 101,325 kPa [16].

$$\rho = 1,2929 \times \left(\frac{273,15}{273,15 + T} \right) \times \left(\frac{P}{1,01325 \times 10^5} \right) \quad (3-9)$$

onde,

ρ → Densidade do ar seco à temperatura T e pressão P (kg/m^3);

T → Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

P → Pressão atmosférica (Pa).

Quando o sentido do vento é contrário ao da velocidade do veículo, a sua velocidade surge na equação com sinal negativo, como representado na Figura 3-4.

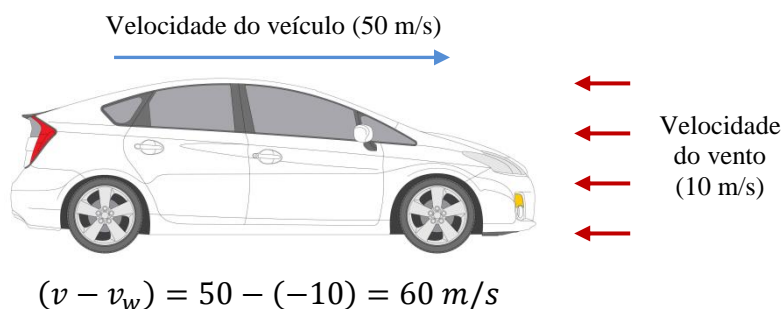


Figura 3-4: Velocidade do veículo oposta à velocidade do vento. Fonte: adaptada [16].

Se o sentido de deslocamento do veículo coincidir com o do fluxo de ar, esta tem uma ação adjuvante, contribuindo no sentido de movimento e na diminuição da potência despendida para a tração do veículo.

O coeficiente de arrasto ou de resistência aerodinâmica C_D permite quantificar a resistência causado pelo escoamento do ar através da superfície de um veículo. A Figura 3-5 mostra valores típicos de coeficientes de arrasto para diferentes formas.

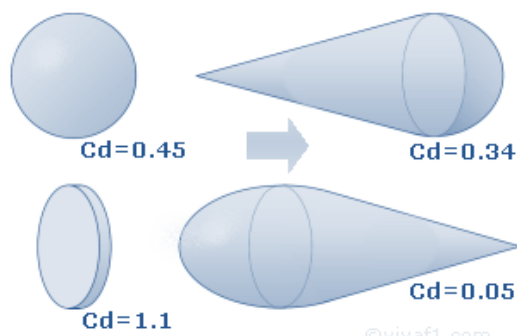


Figura 3-5: Coeficientes de resistência aerodinâmica de diferentes perfis.

Fonte: adaptada de [17].

A melhoria deste parâmetro é preponderante, sobretudo em veículos eléctricos, podendo refletir-se num melhor desempenho e na diminuição do consumo energético. Dada à flexibilidade na disposição dos componentes e a simplicidade do sistema propulsor destes

veículos foi possível o desenvolvimento de carroçarias cada vez mais aerodinâmicas, como se expõe no Quadro 3-2.

Quadro 3-2: Coeficiente de resistência aerodinâmica para diversos veículos eléctricos e híbridos.

Veículo	Coeficiente de resistência aerodinâmico (C_D)	Veículo	Coeficiente de resistência aerodinâmica (C_D)
Toyota Prius	0,25	BMW i8	0,26
Nissan Leaf	0,28	Volkswagen Golf	0,24
Tesla Model S	0,24	Opel Ampera	0,28
Volvo V60	0,28	Chevrolet Volt	0,28
Volkswagen XL1	0,19	Nissan GT-R	0,26
Mercedes-Bens CLA	0,22	Mazda 3	0,26

Fonte: “12 of the most aerodynamic cars in production right now” (<http://motorburn.com/2014/01/12-of-the-most-aerodynamic-cars-in-production-right-now/>).

3.1.3 Força gravítica

Numa superfície inclinada o peso P decompõe-se na componente normal ao plano de circulação, P_n , e tangencial, F_g (Figura 3-6). Esta última constitui uma força, que atua paralelamente ao plano de deslocamento, resistente nas subidas e adjuvante nas descidas.

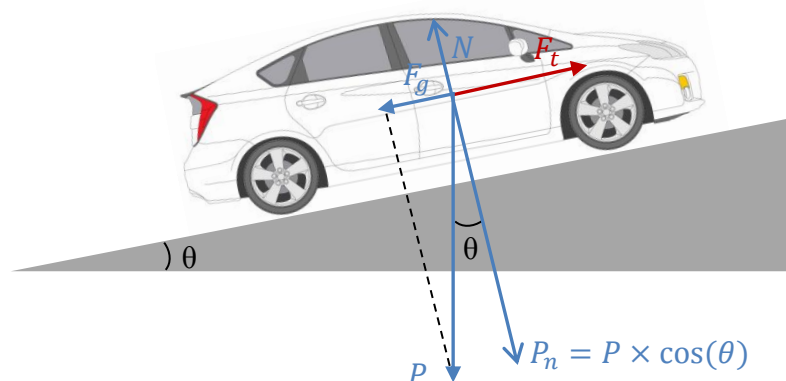


Figura 3-6: Representação da força gravítica num veículo automóvel. Fonte: adaptada de [14].

A componente tangencial F_g pode ser obtida através da equação (3-10).

$$F_g = m \times g \times \text{sen}(\theta) \quad (3-10)$$

onde,

F_g → Força gravítica (N);

m → Massa do corpo (kg);

g → Aceleração gravítica (9,8 m/s²);

θ → Ângulo de inclinação do plano de deslocamento com a horizontal.

Repare-se que quando o veículo desce, em termos de atrito, a força gravítica realiza trabalho negativo, traduzindo-se pelo simétrico do ângulo de inclinação, θ .

3.1.4 Força de inércia

A primeira lei de Newton enuncia que quando a resultante das forças que atuam sobre um corpo é nula, esse permanece em repouso ou em movimento uniforme e retilíneo, ou seja, todo o corpo tende a conservar o estado em que se encontra. Quando aplicada uma força, o corpo fica sujeito a uma aceleração ou desaceleração que modifica o seu estado.

O movimento de um veículo pode ser descomposto pela conjugação do movimento de translação do seu centro de massa e de movimentos de rotação de cada componente rotativo que o integra (as rodas, por exemplo) em torno do seu eixo [18].

Pela Figura 3-7 verifica-se que num movimento de translação puro (a) todos os pontos de uma roda se deslocam em trajetórias paralelas e com velocidade V_c do seu centro de massa. No movimento de rotação puro (b) a velocidade de cada partícula é proporcional ao raio r da circunferência que descreve em torno do eixo que passa pelo centro de massa e da sua velocidade angular. No caso de uma roda em movimento sobre um pavimento (c), há a ação conjunta dos dois princípios.

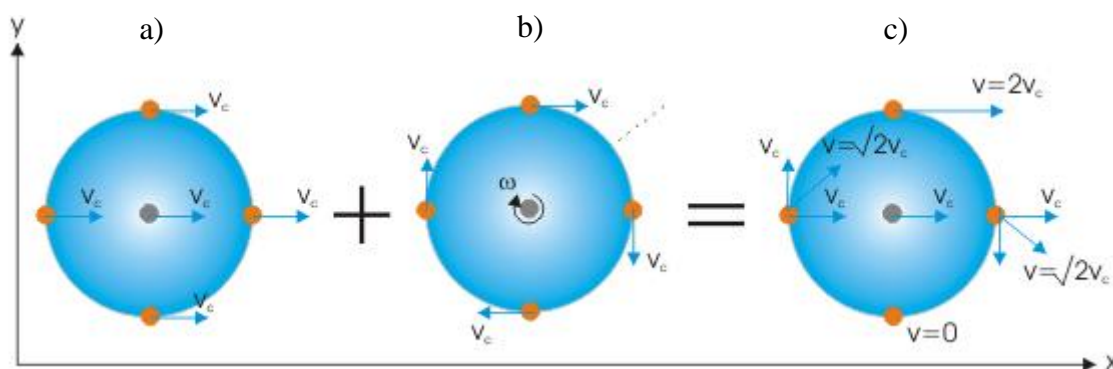


Figura 3-7: Movimento de translação a), rotação b) e combinado c). Fonte: adaptada de [19].

Relativamente ao solo, o ponto situado na parte superior da roda desloca-se a uma velocidade $2V_c$. Na parte inferior da roda como a velocidade de translação surge em sentido oposto ao da velocidade de rotação, o efeito sentido nesse ponto é nulo, o que significa que o movimento de rotação ocorre sem deslizamento [19].

Movimento de translação:

No movimento de translação, a massa de um corpo oferece uma reação à mudança de estado, inércia linear ou inércia de translação, que é tanto maior quanto maior for a sua massa e a aceleração aplicada (3-11).

$$F_{linear} = m \times a \quad (3-11)$$

onde,

F_{linear} → Força de inércia de translação (N);

m → Massa do corpo (kg);

a → Aceleração linear (m/s²).

A energia cinética de um corpo apenas com velocidade linear é determinada pela equação (3-12).

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times V_{CM}^2 \quad (3-12)$$

onde,

E_c → Energia cinética (J);

V_{CM} → Velocidade do centro de massa (m/s).

Movimento de rotação

Para os corpos em rotação, a força de inércia manifesta-se através de uma oposição à alteração do estado (velocidade de rotação) em que se encontram. Esta depende da massa do corpo e da forma como está distribuída em torno do seu eixo e expressa pela grandeza J (momento de inércia). O momento de inércia de um corpo é dado pelo somatório dos momentos de inércia de cada componente em que se divide e encontra-se para o movimento de rotação, como a massa para o movimento de translação [20].

$$J = \sum_{i=1}^n m_i \times r_i^2 \quad (3-13)$$

onde,

J → Momento de inércia (kg/m²);

m_i → Massa cada partícula de 1 a n (kg);

r_i → Distância de cada partícula de 1 a n ao eixo de rotação (m).

A velocidade linear de uma partícula, à distância r do eixo de rotação, é expressa a partir da equação (3-14).

$$v = \omega \times r \quad (3-14)$$

onde,

v → Velocidade linear (m/s);

ω → Velocidade angular (rad/s);

r → Raio da roda (m).

De acordo com a Segunda Lei de Newton quando se aplica uma força F é produzida uma aceleração a na roda. Substituindo a equação (3-15) é possível descrever a ação desta força para um movimento angular.

$$F = m \times a = m \times \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \times \frac{\Delta(\omega \times r)}{\Delta t} \quad (3-15)$$

Num movimento de rotação quando aplicado um binário no eixo que atravessa o centro de massa é produzido uma aceleração angular. Partindo deste pressuposto e sabendo que o binário é dado por:

$$\tau = F \times r \quad (3-16)$$

obtém-se a equação (3-17).

$$F \times r = m \times r^2 \times \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad (3-17)$$

Uma vez que o quociente entre a variação da velocidade angular e o tempo é dado pela aceleração angular, chega-se à equação:

$$F \times r = m \times r^2 \times \alpha \quad (3-18)$$

Desta forma obtém-se a segunda lei Newton para o movimento de rotação de uma partícula, expresso pela equação (3-19).

$$\tau = m \times r^2 \times \alpha \quad (3-19)$$

A equação (3-19) pode ser definida como o produto do momento de inércia pela aceleração angular. Da análise da equação (3-20) concluiu-se que para corpos de massa igual mas com uma distribuição diferente relativamente ao centro da roda de um veículo são adquiridas diferentes acelerações angulares, supondo que o binário aplicado é constante.

$$\tau = J \times \alpha \quad (3-20)$$

onde,

τ → Binário (N.m);

J → Momento de inércia de uma partícula (kg/m²);

α → Aceleração angular (rad/s²).

Da equação (3-20) concluiu-se que a inércia angular está para o movimento de rotação, como a inércia linear está para o movimento de translação.

A força de inércia equivalente associada ao movimento de rotação é determinada pela equação (3-21).

$$F'' = \frac{\tau}{r} = \frac{J \times \alpha}{r} \quad (3-21)$$

Sabendo que a aceleração angular é dada pelo quociente entre a aceleração linear e o raio é possível descrever a equação (3-21) através de componentes lineares.

$$F'' = \frac{J \times a}{r^2} \quad (3-22)$$

onde,

$F'' \rightarrow$ Força de inércia de rotação (N).

A energia cinética associada ao movimento de rotação de uma roda depende da velocidade angular e do momento de inércia, sendo determinada pela equação (3-23).

$$E_c = \frac{1}{2} \times J \times \omega^2 \quad (3-23)$$

Força de inércia total:

Para a modelização da performance dinâmica de um veículo, a inércia total é dada pela soma da força de inércia de translação e da força de inércia de rotação.

$$F_i = m \times a + \frac{J \times a}{r^2} \quad (3-24)$$

Substituindo cada um dos termos da equação pelas respectivas expressões, obtém-se a equação (3-25).

$$F_i = m \times a \times \left(1 + \frac{J}{m \times r^2}\right) \quad (3-25)$$

A equação (3-25) pode ser simplificada à expressão seguinte:

$$F_i = m \times a \times (1 + \delta) \quad (3-26)$$

Onde,

$$\delta = \frac{J}{m \times r^2} \quad (3-27)$$

δ é denominado por **factor de massa** e traduz o aumento percentual da massa do veículo devida à inércia angular dos seus componentes rotativos.

3.1.5 Força de resistência total

A força de tração necessária para que o veículo permaneça a uma determinada velocidade é dada pela soma das forças anteriores.

$$F_R = P \times f_r \times \cos(\theta) + \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_D \times (v - v_w)^2 + m \times g \times \sin(\theta) + m \times a \times (1 + \delta) \quad (3-28)$$

Repare-se que a força de inércia e a força gravítica são negativas quando o veículo desacelera ou numa descida, respectivamente.

3.2 Outros parâmetros

Com base na força de resistência total podem ser conhecidos outros parâmetros relativos ao comportamento cinemático do veículo. Estes são a velocidade de rotação, o binário desenvolvido, a potência mecânica a aplicar nas rodas, assim com a potência eléctrica debitada pela bateria, como se apresentam a seguir.

3.2.1 Velocidade de rotação no motor

A velocidade de rotação no veio do motor v_{rpm} pode ser calculada de acordo com a equação (3-29).

$$v_{rpm} = \frac{v \times 60}{2 \times \pi \times r_{roda}} \times r_t \quad (3-29)$$

onde,

v_{rpm} → Velocidade de rotação do motor (rpm);

v → Velocidade do veículo (m/s);

r_{roda} → Raio da roda (m);

r_t → Relação de desmultiplicação entre o motor e as rodas.

A relação de desmultiplicação, r_t , obtém-se do produto entre a relação do diferencial e a relação da caixa de transmissão.

3.2.2 Potência mecânica a aplicar nas rodas

A potência mecânica a aplicar às rodas para vencer a força de resistência total é dada pela equação (3-30).

$$P_m = v \times F_R \quad (3-30)$$

onde,

P_m → Potência mecânica entregue às rodas num dado instante (W);

v → Velocidade do veículo nesse instante (m/s).

F_R → Força de resistência total (N).

3.2.3 Potência eléctrica

A potência eléctrica fornecida pela bateria é dada pela equação seguinte.

$$P_e = \frac{v(t)}{\eta_e \times \eta_t} \times \left(P \times f_r \times \cos(\theta) + \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_D \times (v - v_w)^2 + m \times g \times \sin(\theta) + m \times a \times (1 + \delta) \right) \quad (3-31)$$

onde,

P_e → Potência eléctrica debitada pela bateria (W);

η_t → Rendimento mecânico de transmissão;

η_e → Rendimento eléctrico do conjunto “controlador + motor”.

3.2.4 Binário motor

O binário desenvolvido pelo motor pode ser obtido através da equação (3-32).

$$B = \frac{F_R \times r_{roda}}{r_t \times \eta_t} \quad (3-32)$$

onde,

B → Binário desenvolvido pelo motor (N.m).

Com base nas equações anteriores é possível determinar a relação entre o binário e a potência mecânica aplicada nas rodas em função da velocidade de rotação do motor, de acordo com a equação (3-33).

$$B = \frac{P_m \times 9549}{v_{rpm}} \quad (3-33)$$

ou

$$P_m = \frac{B \times v_{rpm}}{9549} \quad (3-34)$$

4. Tecnologias de armazenamento de energia

A expansão das tecnologias da informação e comunicação portáteis desencadeou o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia eléctrica que suportassem uma densidade de energia cada vez maior. Potenciada também pela necessidade de estender a autonomia dos veículos eléctricos e pela crescente exploração de fontes de energia renováveis, caracterizadas pela sua intermitência e não despachabilidade, as tecnologias de armazenamento têm vindo a ser alvo de grande investigação nas últimas décadas. Na base desta motivação está ainda o inevitável declínio no panorama energético tradicional assente em fontes fósseis, à medida que aumenta a percepção da sua esgotabilidade, do aumento do custo e dos impactos ambientais que resultaram do seu uso.

Com o armazenamento de energia torna-se possível adequar a geração de electricidade a partir de fontes renováveis ao perfil de consumo, reduzindo significativamente a dependência de combustíveis fósseis. Em Portugal salienta-se a importância que estas tecnologias podem vir a desempenhar numa maior sustentabilidade do sector eléctrico, atendendo a que em 2014 a produção de electricidade de origem renovável foi de 62,7% da energia eléctrica consumida, como revela a Figura 4-1 divulgada pela Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN).

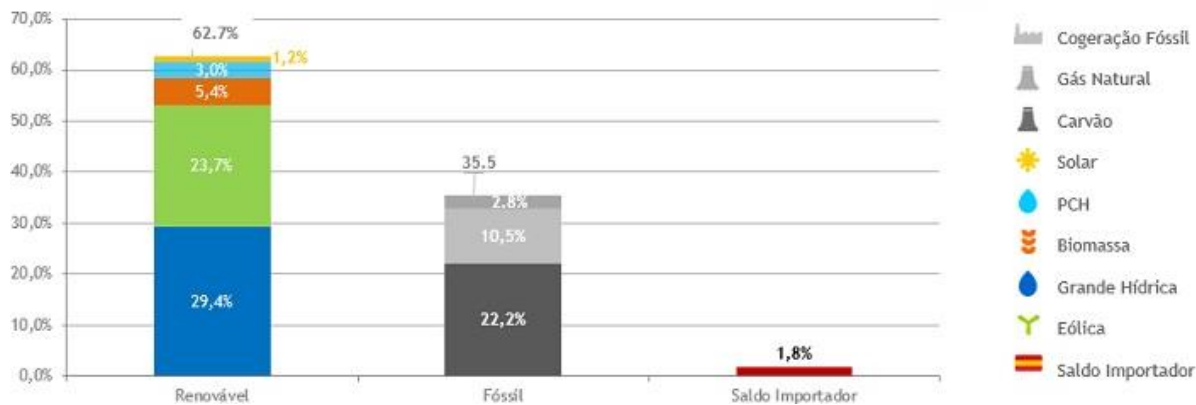


Figura 4-1: Geração de electricidade por origem em Portugal em 2014 [21].

Mas, é no sector dos transportes que o armazenamento de energia poderá vir a ganhar maior relevância na mudança do paradigma energético. O desenvolvimento de tecnologias de armazenamento eficientes, seguras, duráveis, com custos comedidos e capacidade para proporcionar autonomia semelhante à do automóvel convencional, permitirá acelerar a penetração de sistemas de mobilidade eléctrica alimentados com energia cada vez mais descarbonizada.

4.1 Armazenamento de energia e sistemas de mobilidade

Um sistema de armazenamento de energia é na sua essência um dispositivo de conversão de energia, “a energia não se cria nem se perde, simplesmente se converte de uma forma de energia numa outra”, expressão esta que traduz a Primeira Lei da Termodinâmica. Além disso há a referir que nessa conversão uma parte é dissipada sob outra forma, refletindo-se na diminuição da energia útil. Este processo é descrito pela Segunda Lei da Termodinâmica que enuncia que o rendimento é sempre inferior a 100% [22].

4.1.1 Tecnologias de armazenamento de energia

As tecnologias de armazenamento de energia podem ser agrupadas quanto à sua finalidade (móveis ou estacionárias) e ao modo como armazenam a energia e que são sob as formas mecânica, térmica, química e eléctrica [23].

No armazenamento de energia sob a forma mecânica esta é armazenada no seio de um líquido, sólido ou gás na forma de energia potencial gravítica ou cinética e de, entre as alternativas de Volante de Inércia, Sistema de Ar Comprimido e Sistema de Bombagem.

Na alternativa térmica a energia pode ser armazenada sob a forma de calor ou frio em fluidos ou materiais cerâmicos, consoante as necessidades da aplicação.

Na alternativa química a energia é armazenada numa substância na qual ocorre uma reacção química, podendo posteriormente ser disponibilizada parte dessa energia através de uma reacção inversa. As tecnologias mais comuns são as baterias electroquímicas, as baterias de

fluxo regenerativo e a produção de Hidrogénio a partir da electrólise da água. O principal ponto fraco destas alternativas é o facto de envolverem reações químicas, quer para o armazenamento quer para a libertação de energia, que provocam perdas sob a forma de calor. Outras limitações incluem o uso de substâncias tóxicas, um tempo de vida relativamente curto e não suportarem cargas e descargas rápidas pela limitação intrínseca da velocidade das reações químicas necessárias.

O armazenamento de energia eléctrica pode ser feito de forma direta apenas com dois dispositivos. Através do uso de condensadores e do uso de bobinas.

Nos condensadores a energia é armazenada no campo eléctrico existente no dieléctrico entre as armaduras que o constituem. A capacidade C (medida em Farad) é diretamente proporcional à permitividade do dieléctrico (ϵ) e à área (A) das armaduras e inversamente proporcional à distância d entre elas ($C = \epsilon \cdot A/d$). A energia armazenada é dada por: $E = 1/2 \cdot C \cdot V^2$. O uso de materiais com permitividades cada vez mais elevadas e espessuras mais finas tem permitido a obtenção de condensadores com grandes capacidades em volumes compactos. Estes são denominados por super ou ultra condensadores e têm um papel cada vez mais relevante no armazenamento de energia devido ao facto de suportarem milhões de ciclos de carga/descarga, serem extremamente robustos e permitirem elevadas densidades de potência. O ponto fraco é, por enquanto, a densidade de energia alcançável (Joules/kg) que não consegue competir com a tecnologia electroquímica.

Nas bobinas a energia é armazenada no seio do seu núcleo ferromagnético sob a forma de dipólos magnéticos. A energia armazenada é dada por: $E = 1/2 \cdot L \cdot I^2$. Para mitigar a taxa de auto-descarga são utilizados materiais supercondutores na constituição da bobina que requerem sistemas caros e dispêndio de energia para manter as baixas temperaturas. Apesar de exequível, esta alternativa não tem merecido grande atenção devido à baixa performance e elevados custos de fabrico e operação.

4.1.2 Requisitos do armazenamento de energia na mobilidade eléctrica

O armazenamento de energia para uso na mobilidade eléctrica requiere soluções que cumpram os requisitos:

- **Segurança** – É o critério mais importante a garantir num veículo eléctrico. Os riscos de ocorrerem falhas podem ser controlados se forem asseguradas as condições de funcionamento para as quais o sistema de armazenamento foi projetado.
- **Densidade de energia**- Representa a quantidade de energia armazenada por unidade de volume (Wh/l) ou de massa (Wh/kg).
- **Densidade de potência** – Quantifica o débito de energia que o sistema pode fornecer por unidade de tempo e de volume (W/l) ou unidade de massa (W/kg).
- **Capacidade de armazenamento** - Define a quantidade de energia (Wh ou Ah) que é possível armazenar no sistema.

- **Número de ciclos de carga e de descarga** - Corresponde ao número de vezes que o sistema de armazenamento pode ser carregado e descarregado completamente durante o seu ciclo de vida.
- **Eficiência energética** - É um valor percentual que relaciona a quantidade de energia disponibilizada numa descarga relativamente à energia que foi armazenada.
- **Taxa de auto-descarga** - Corresponde ao valor percentual de energia que é perdida por unidade de tempo de não funcionamento.
- **Robustez mecânica e térmica** - Caracteriza a resistência a choques mecânicos e térmicos sem comprometer o funcionamento normal da unidade de armazenamento.
- **Custo** – Embora não constitua um elemento intrínseco da tecnologia é um factor determinante na seleção de um sistema de armazenamento. Este incluiu o custo inicial, de operação e de manutenção e das perdas de energia durante os ciclos de carga/descarga. É frequente exprimir-se em €/kWh e €/kW.

As tecnologias atualmente melhor posicionadas para cumprir estes requisitos são as baterias electroquímicas e os supercondensadores que apesar, de se encontrarem em permanente desenvolvimento, permitem já desempenhos comparáveis, em algumas dimensões, com a tecnologia de combustão.

A combinação da densidade de energia das baterias à base de Lítio, com a densidade de potência dos supercondensadores possibilitam performances adequadas às necessidades de um veículo eléctrico em autonomia, desempenho dinâmico, segurança e durabilidade. Contudo, o seu custo é ainda um factor que dificulta a rápida adopção.

4.2 Funcionamento da bateria electroquímica

A tecnologia electroquímica assenta na conversão de energia eléctrica em química e vice-versa, através de reações de oxidação-redução entre os eléctrodos de cada célula da bateria. Estes são o ânodo (pólo negativo) e o cátodo (pólo positivo) entre os quais flui uma corrente eléctrica resultante das reações químicas com a solução onde se encontram imersos, o electrolítico, exibindo sentidos contrários durante as fases de carga e de descarga, de acordo com a Figura 4-2.

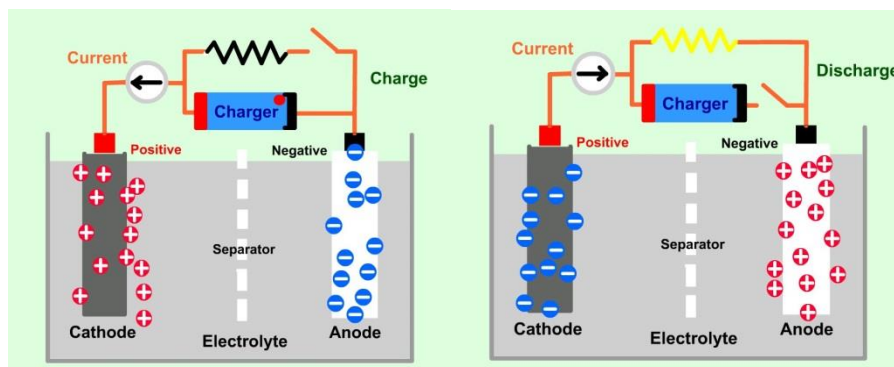


Figura 4-2: Funcionamento de uma célula electrolítica na carga (esquerda) e na descarga (direita) [24].

4.2.1 Parâmetros críticos

O desempenho de uma bateria depende de factores externos e internos, inerentes à constituição e às propriedades químicas de cada tecnologia. O conhecimento de como cada um destes factores afecta o seu funcionamento permite, através da implementação de sistemas de monitorização e controlo, cumprir os requisitos de operação de cada célula, a fim de maximizar o seu desempenho e vida útil. Estes são basicamente os limites de variação da tensão, corrente e temperatura, que definem a região segura de operação ou *Safety Operating Area* (SOA), para a qual é minimizada a degradação da célula. O funcionamento fora da SOA tem as seguintes consequências:

- A redução do ciclo de vida;
- Danos prematuros, provocados por descargas abaixo do limite inferior de tensão, comprometendo o normal funcionamento;
- Possibilidade de incêndios na sequência do derrame do material químico, originados por sobrecargas a partir de um determinado valor de tensão ou corrente.

É a este nível que ocorre a intervenção de um sistema de gestão de bateria ou *Battery Management System* (BMS), cuja função é assegurar os parâmetros críticos do funcionamento de cada célula dentro dos limites da SOA.

A tecnologia utilizada, o modo como é operada e o ambiente onde se encontra, condicionam o funcionamento das células e definem os parâmetros a seguir descritos.

Máxima tensão por célula

Para cada tipo de química existe uma tensão de operação que não deve ser excedida. Uma célula que não cumpra este requisito não garante o desempenho esperado nas condições normais de funcionamento comprometendo o seu tempo de vida útil [25].

Máxima corrente de descarga

Este parâmetro define a corrente máxima de descarga suportada por uma célula sem interrupção do funcionamento, estando salvaguardado o limite superior de temperatura devido ao calor dissipado por efeito de Joule.

A corrente de descarga expressa-se geralmente em C da capacidade total da bateria e define a quantidade de energia debitada em relação à capacidade de armazenamento. Por exemplo, a descarga a 1C, para uma célula com capacidade de 500 mAh, corresponde ao débito de uma corrente de 500 mA durante uma hora. Se considerarmos uma descarga a 2C, a corrente debitada será de 1000 mA durante meia hora [26].

Resistência interna

A resistência interna determina a eficiência em cada ciclo de carga e de descarga devido às perdas de energia por efeito de Joule ($P = R \cdot I^2$). Esta limita a capacidade efectiva traduzindo-se na diminuição da tensão aos terminais da célula durante a descarga e no aumento da tensão necessária para a recarga, e num aumento da temperatura interna que é necessário controlar.

Temperatura de funcionamento

Independentemente da química da bateria o desempenho decai significativamente para baixas temperaturas, podendo provocar uma redução permanente da capacidade, pelo que é fundamental estabelecer um limite mínimo para a temperatura de operação. No que se refere ao limite máximo, se esse for ultrapassado, os materiais podem deteriorar-se, provocar uma fuga térmica e destruir a bateria. Entre estes limites de temperatura o desempenho das células melhora geralmente com o aumento da temperatura, em consequência da diminuição da resistência interna [25].

4.2.2 Tipo de encapsulamento

As células electroquímicas são atualmente fabricadas sob as formas cilíndrica e prismática. Porém, as cilíndricas são as mais utilizadas na maioria das aplicações portáteis devido aos baixos custos proporcionados pela massificação da produção e à elevada automatização dos processos de fabrico. Além disso, um sistema de armazenamento que utilize um grande número de pequenas células torna-o menos vulnerável à falha eventual de uma ou mais delas. Estas suportam pressões internas elevadas sem se deformar, enquanto as prismáticas são mais frágeis nesse aspecto. O principal inconveniente das células cilíndricas é o volume inutilizado no agrupamento das células mas que por outro lado facilita a ventilação. No caso das células prismáticas o espaço é maximizado permitindo obter baterias mais compactas [27].

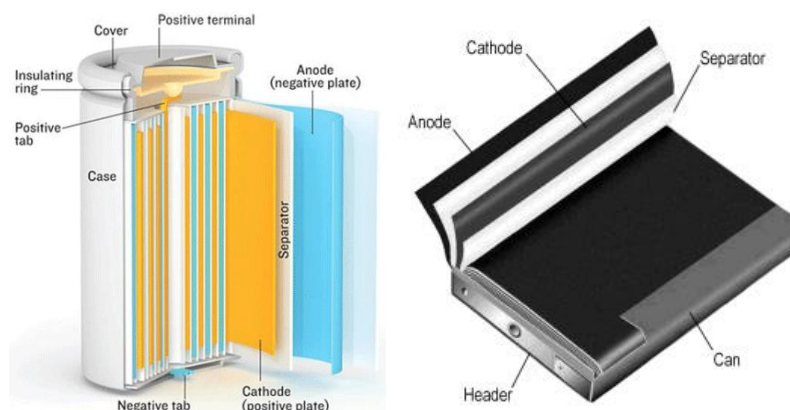


Figura 4-3: Célula cilíndrica (à esquerda) e prismática (à direita) [28] e [29].

As baterias cilíndricas de modelo 18650 foram consideradas desde o início do projeto como a aposta para a implementação do sistema de armazenamento de energia. Estas suportam um elevado número de ciclos e elevada densidade de energia, além de constituírem uma solução disponível e de menor custo.

4.3 Tecnologias electroquímicas em uso na mobilidade eléctrica

Devido às restrições de segurança, densidade de energia e densidade de potência exigidas, apenas um pequeno número de tecnologias electroquímicas estão a ser utilizadas na mobilidade eléctrica. As mais utilizadas são as baterias de hidretos metálicos de Níquel e de iões de Lítio nos PHEV e BEV.

4.3.1 Baterias à base de Níquel

Existem quatro tecnologias de baterias à base de Níquel, contudo é aqui analisada apenas a bateria de hidreto metálico de Níquel (Ni-MH), sendo considerada por alguns fabricantes como a mais adequada para a mobilidade eléctrica. Estas células são particularmente sensíveis a descargas profundas e elevadas correntes de descarga, refletindo-se na sua performance e encurtamento do tempo de vida. A sua principal vantagem reside no baixo teor de toxinas e custo. Exibem uma reciclagem fácil, traduzindo-se na diminuição do seu impacto ambiental [30] [31].

4.3.2 Baterias à base de Lítio

As baterias à base de Lítio constituem a tecnologia hoje mais utilizada na mobilidade eléctrica. Estas distinguem-se pela elevada segurança, densidade de energia, eficiência e baixa manutenção, o que as torna adequadas para aplicações portáteis, como é o caso. O seu maior inconveniente é serem bastante sensíveis à temperatura e exigirem o balanceamento dos níveis de tensão e máxima corrente, por forma a evitar danos prematuros.

As combinações na tecnologia de íão de Lítio diferem sobretudo na constituição do cátodo. As químicas utilizadas em mobilidade eléctrica são:

- Óxido de Lítio Níquel Manganês e Cobalto (LiNiMnCoO_2): o cátodo é uma combinação de Níquel, Manganês e Cobalto e o ânodo é de Grafite. Distinguem-se pela elevada densidade de energia e apresentam uma resistência interna na ordem de 25 a 75 m Ω por célula, exibindo um potencial electroquímico de 3,6 V.
- Lítio Fosfato de Ferro (LiFePO_4): recorre à nanotecnologia na constituição do cátodo de fosfato de Ferro e de um ânodo de Silício. Apresentam uma boa tolerância a sobrecargas e excelentes propriedades térmicas, o que as torna muito seguras. Caracterizam-se pelo elevado número de ciclos de carga podendo suportar descargas profundas. Contudo, apresentam uma elevada taxa de auto-descarga e uma baixa densidade de energia de entre as restantes tecnologias de íões de Lítio. O potencial electroquímico é de 3,2 V.
- Titanato de Lítio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$): utiliza nanocristais de Titanato de Lítio nos eléctrodos em vez do típico Carbono, o que possibilita uma maior longevidade mesmo para correntes de descarga elevadas. Possuem uma boa performance a baixas temperaturas, contudo apresentam uma menor densidade de energia. O potencial electroquímico é de 2,5 V.
- Óxido de Lítio Manganês (LiMn_2O_4): o cátodo é formado por estrutura tridimensional cristalina de óxido de Manganês, refletindo-se numa resistência interna muito baixa, permitindo elevadas correntes de descarga [32]. O potencial electroquímico é de 3,8 V.

A Figura 4-4 sintetiza, segundo seis parâmetros, o desempenho das tecnologias de íões de Lítio descritas acima.

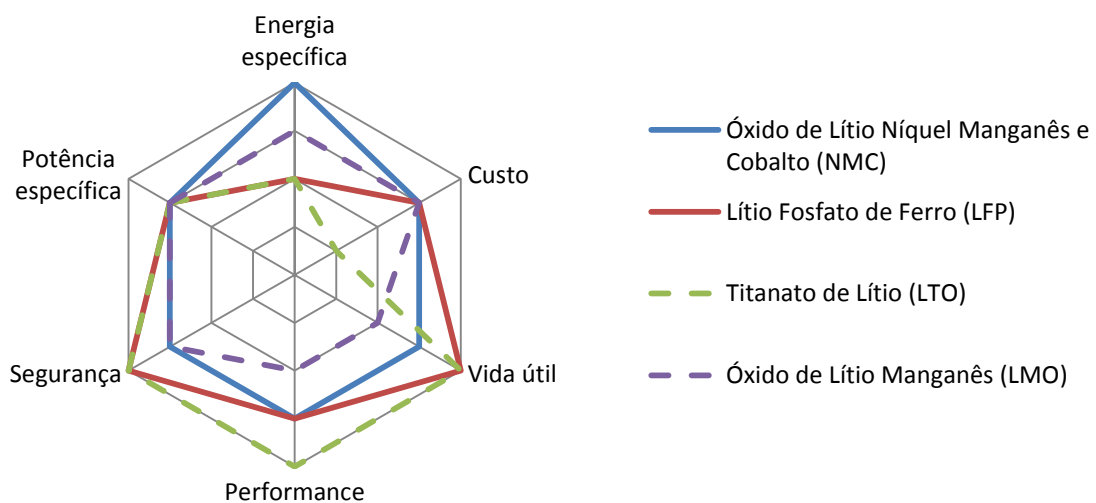


Figura 4-4: Características das tecnologias de íões de Lítio utilizadas na mobilidade eléctrica. Fonte: adaptada de [33].

4.3.3 O factor custo

O custo da bateria constituiu ainda o maior obstáculo para a penetração mais rápida dos veículos eléctricos. Os progressos das tecnologias em uso e a massificação da produção permitirão economias de escala, tornando a alternativa eléctrica cada vez mais competitiva relativamente à de combustão. Uma projecção divulgada pela Rocky Mountain Institute (RMI) em abril de 2015, exposta na Figura 5-5, revela para 2050 uma redução acentuada do custo destas tecnologias, tendo já sido exibida uma descida considerável nos últimos anos. É de referir que desde janeiro de 2015 o preço de comercialização de um *pack* de baterias de substituição do Nissan Leaf com capacidade de 24 kWh é de \$ 5499 US, o que representa um custo de 230 \$/kWh, antecipando-se a algumas das previsão apontadas para 2020 (Figura 5-5) [34].

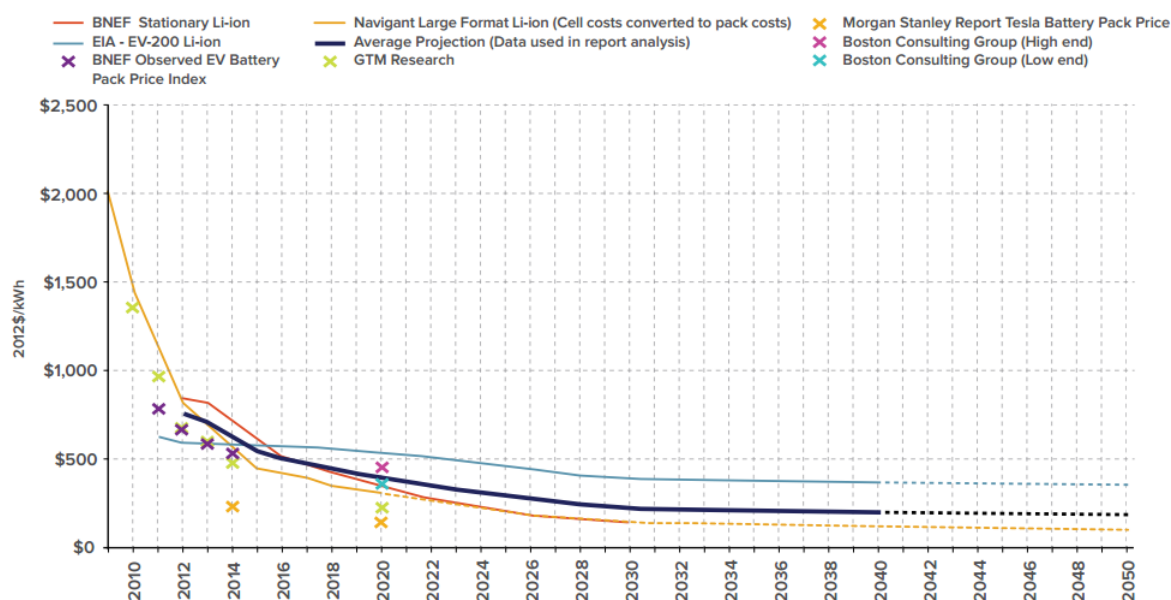


Figura 4-5: Previsão da evolução do custo das baterias em \$/kWh [35].

Neste âmbito destaca-se a aposta da Tesla Motors com a construção de uma giga-fabrica, no estado do Nevada (USA), para a produção de baterias de iões de Lítio que espera alcançar uma redução de mais de 30% do custo de uma bateria até 2020. Com esta medida esta empresa espera um aumento da capacidade de produção de veículos eléctricos das atuais 35.000 para 500.000 unidades por ano em 2020 [36].

4.3.4 Parâmetros relevantes das tecnologias electroquímicas

De entre as tecnologias electroquímicas referidas atrás, são expostas no Quadro 4-1 as mais utilizadas atualmente na mobilidade eléctrica.

Os valores expostos revelam que não existe uma tecnologia vencedora em todas as dimensões, o que significa que a escolha de uma bateria que optimize a performance de uma

característica exige sacrificar outras. A necessidade de maior segurança, densidade de energia e performance, combinadas com o menor custo, constituem a prioridade dos fabricantes.

Quadro 4-1: Características das baterias em uso na mobilidade eléctrica.

	Hidreto metálico de Níquel	Titanato de Lítio	Óxido de Lítio Manganês	Óxido de Lítio Níquel Manganês e Cobalto	Lítio Fosfato de Ferro
Tensão nominal por célula (V)	1,2	2,5	3,8	3,6	3,2
Densidade de energia (Wh/kg)	60-120	65-100	105-115	140-155	90-110
Ciclo de vida para DoD até 80%	300-500	12000	>500-1000	>700	>1800
Taxa de auto-descarga %/mês	30%	-	5%	1%	0,05%
Máxima corrente de descarga (C)	5 C	10 C	10 C	20 C	30 C
Faixa de temperatura de operação na descarga (°C)	-20 a 65°C	-50 a 75°C	-50 a 75°C	-20 a 60°C	-20 a 60°C

Fonte: “Comparison table of secondary batteries”, (<http://batteryuniversity.com>).

4.4 Tecnologias de continuidade e de ruptura

Decorrente das exigências colocadas aos fabricantes para que as baterias suportem uma maior densidade de energia, tem vindo a assistir-se nos últimos anos a um grande dinamismo na experimentação de novas configurações químicas. As potencialidades facultadas pelas nanotecnologias veio também possibilitar a obtenção de novos materiais numa escala nanométrica e com propriedades nunca antes conseguidas. Ainda a dar os primeiros passos, as nanotecnologias têm permitido a melhoria contínua da tecnologia electroquímica à medida que esta ciência evolui.

As baterias à base de Lítio e os supercondensadores são consideradas tecnologias com grande potencial por explorar, tendo captado nos últimos anos avultados investimentos.

4.4.1 Aposta na melhoria da tecnologia com Iões de Lítio

A Envia Systems desenvolveu uma célula de iões de Lítio com uma densidade de energia de 400 Wh/kg a cerca de metade do preço das concorrentes, para além de ser uma tecnologia segura. A sua produção assenta no uso do Silício, um material de custos comedidos, conhecido pela excelente capacidade de absorção de iões de Lítio que combinado com um cátodo de Manganésio permitem atingir um potencial electroquímico de 4,6 V. A principal limitação, ainda por superar e que tem retardado a sua comercialização, está no curto tempo de vida permitindo pouco mais de 400 ciclos [37].

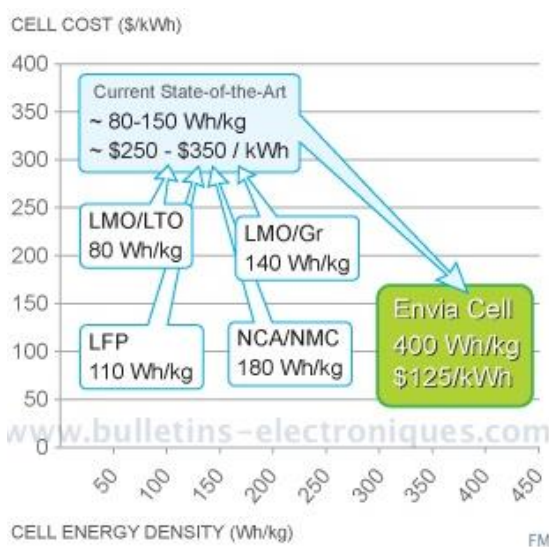


Figura 4-6: Densidades de energia *versus* custos por célula para diversas tecnologias [37].

4.4.2 Aposta no Lítio-ar

O conceito da combinação Lítio-ar não é recente mas, só a partir de 2000 é que foi intensamente explorado, devido ao potencial em suportar uma elevada densidade de energia. Nestas baterias, os óxidos de metais do cátodo são substituídos por Carbono, um material disponível a baixo custo, que reage com o Oxigénio libertando electrões e produzindo assim uma corrente eléctrica.

A International Business Machines (IBM) desenvolveu um protótipo desta bateria com elevada capacidade, contudo está ainda longe da viabilidade. A baixa eficiência, o reduzido número de ciclos de carga/recarga e a necessidade de um sistema de filtragem do Dióxido de Carbono, por forma a evitar reacções indesejáveis que alteram a química da bateria, constituem alguns dos problemas por superar [38] [39]. A Figura 4-7 compara a densidade de energia proporcionada por uma bateria de Lítio-ar relativamente a outras tecnologias utilizadas em veículos eléctricos, assim como nos veículos a combustão.



Figura 4-7: Densidade de energia para diferentes tecnologias de armazenamento [40].

4.4.3 Supercondensadores

Devido à densidade de energia até agora alcançada com os supercondensadores, as investigações têm-se centrado no desenvolvimento de materiais que permitam maximizar as áreas das armaduras, como o Grafeno, os nanotubos de Carbono e o Aerogel, tendo sido alcançados valores de capacitâncias promissoras que comprovam o potencial destes materiais. Porém, estes são já aplicados na mobilidade eléctrica para complementar a tecnologia electroquímica, permitindo uma resposta mais eficiente na travagem regenerativa e na aceleração, quando são solicitados picos de potência [41] [42].

4.4.4 Aposta no Sulfureto de Lítio (Lítio Sulphur)

As baterias de Sulfureto de Lítio recorrem às propriedades do Enxofre para aumentar a capacidade de absorção de cargas eléctricas no cátodo em detrimento do uso de metais pesados como o Cobalto, Manganês ou o Níquel, permitindo obter uma densidade de energia superior às melhores baterias de iões de Lítio. A existência do Enxofre em abundância e com custos atrativos faz desta tecnologia uma alternativa aliciante, também para os veículos eléctricos.

Os investigadores da Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) desenvolveram já uma bateria com densidade de energia de 500 Wh/kg podendo efetuar mais de 1500 ciclos de carga/descarga, tendo também anunciado que o custo praticado será inferior a 100 \$/kWh. Contudo, é ainda uma tecnologia questionada quanto à eficiência, segurança e degradação precoce da sua capacidade [43] [44].

4.4.5 Uma aposta híbrida

Apesar dos progressos feitos na descoberta de novas combinações químicas que possibilitem uma maior densidade de energia, essas não competem na densidade de potência com os supercondensadores de que já dispomos. Para colmatar esta limitação, há fabricantes a combinar a elevada densidade de potência dos supercondensadores com a densidade de energia proporcionada pela tecnologia electroquímica, por forma a obter um sistema híbrido mais eficiente. Todavia, esta é ainda uma solução no início de exploração.

No Institute Nanosystems Califórnia os investigadores tem procurado associar num único material as melhores características destas duas alternativas. Espera-se que com a combinação das propriedades eléctricas e químicas se possa criar um novo método de armazenamento, que além da elevada densidade de energia, seja capaz de suportar cargas/descargas rápidas e possua um ciclo de vida idêntico ao de um supercondensador, com custos comedidos. Este é um conceito que tem vindo a ser perseguido mas, a sua concretização só agora foi possível com o uso das nanotecnologias [45].

O desenvolvimento de uma nova tecnologia de armazenamento de energia viável exige até chegar ao mercado um período que pode demorar 20 anos. Algumas das tecnologias acima referidas estão em investigação há muitos anos, como o Lítio-ar, outras, porém são ainda recentes, o que pode significar o surgimento de uma alternativa viável melhor que as atuais. Por enquanto vamos ter que conviver com as tecnologias em uso.

4.5 Questões práticas de projeto

No projeto de uma bateria deve atender-se ao seu fim, ao tipo de célula, tamanho e encapsulamento a utilizar em função das características da aplicação, das condições de operação e da capacidade de armazenamento pretendida.

No caso de utilização de células pequenas, embora seja facilitado o controlo de energia na eventualidade de uma hipotética falha, envolvem sistemas de controlo mais complexos devido ao elevado número de ligações e BMS mais dispendiosos, comparativamente com células de maiores dimensões. Como foi atrás referido, para que estes sistemas cumpram com os requisitos é fundamental o uso de um BMS para assegurar o melhor desempenho.

Apesar de existirem já células robustas, a maioria não está acessível ao público em geral, pelo que no projeto da nossa bateria estamos limitados ao uso de componentes disponíveis comercialmente.

5. Sistemas de Gestão da Bateria

O BMS é um elemento crucial num veículo eléctrico, contribuindo para uma operação segura e a longevidade da bateria. Este realiza a monitorização e o controlo dos parâmetros operacionais durante a carga e a descarga da bateria tais como, tensão, corrente e temperatura, prevenindo que as células não operem fora da SOA. Este processo é complexo e requer interfaces de comunicação com outros sistemas a bordo, permitindo intervir, em tempo real, face a uma eventual alteração das condições de carga e de descarga. É de salientar que o perfil imprevisível e adverso do ambiente automóvel com acelerações, desacelerações e variações da temperatura ambiente exige respostas rápidas.

Além de proteger as células contra danos prematuros, o BMS assegura o funcionamento da bateria num estado que permite o seu melhor desempenho, maximizando a quantidade de energia armazenada em cada ciclo de carga e de descarga.

5.1 Monitorização das grandezas críticas na tecnologia electroquímica

Independentemente da tecnologia do BMS este deve cumprir três objectivos: 1. garantir um estado que permita à bateria cumprir os requisitos para que foi projetada, 2. maximizar a capacidade de armazenamento e 3. proteger as células por forma a prolongar a sua vida útil. Para isso é necessário que este implemente as funções de medição, protecção, controlo térmico e balanceamento a fim de controlar os parâmetros críticos, que se analisam a seguir.

5.1.1 Medição da tensão, corrente e temperatura

Esta função incorpora a medição da tensão, corrente e temperatura por forma a evitar que sejam excedidos os limites da SOA das células que integram a bateria. A medição destes parâmetros pode ser concretizada de diferentes formas, consoante a precisão e a fiabilidade requerida para a aplicação. De modo individualizado, com um dispositivo de medição por célula, ou localizada com um dispositivo para um agrupamento de células. A seguir são referidos apenas os métodos mais utilizados em veículos eléctricos.

Medição da tensão

Para a medição da tensão são utilizadas placas de circuito integrado, designadas por *cell boards*, que medem a tensão aos terminais de cada célula ou grupo de células em paralelo, utilizando um conversor analógico/digital (tipicamente com 10 a 12 bits, conferindo-lhe uma resolução inferior a 1 mV) para que o sinal possa ser lido pelo BMS. Estas permitem a medição simultânea em todas as células e conferem elevada fiabilidade, permitindo que o BMS possa identificar com rigor e no mesmo instante o estado de cada célula, assim como o de outras variáveis (a resistência interna de cada célula ou a tensão do *pack*).

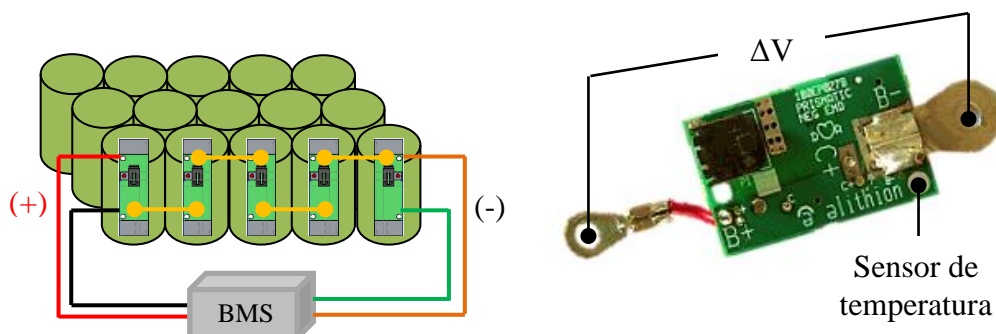


Figura 5-1: Medição da temperatura e tensão com *cell boards*. Fonte: adaptada de [46]

A medição da tensão pode ser também realizada para um agrupamento de células recorrendo a um multiplexer analógico (Figura 5-2) que seleciona a célula a medir. Nesta topologia a leitura é realizada pelo mesmo conversor A/D para todas as células. O principal inconveniente reside no atraso introduzido entre a leitura de cada célula pelo multiplexer e no conversor A/D, refletindo-se na fiabilidade do sistema. Além disso, são menos imunes a ruídos que a primeira alternativa onde a tensão é medida localmente na *cell board*.

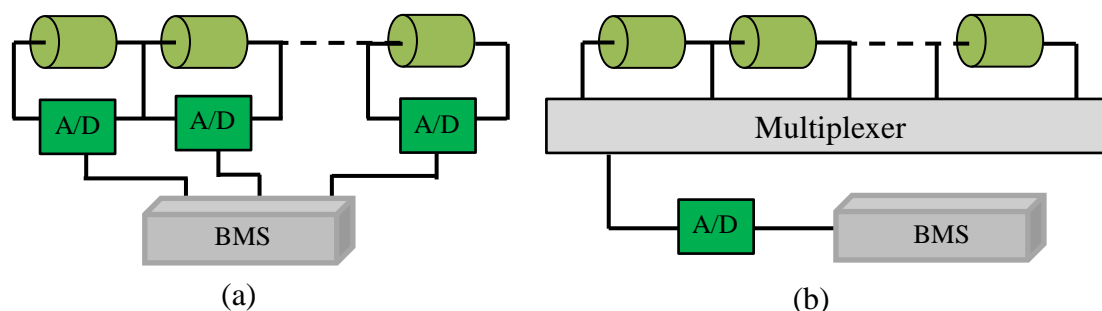


Figura 5-2: Medição da tensão (a) por célula ou (b) para um grupo de células.
Fonte: adaptada de [47].

Medição da corrente

A corrente é medida durante a carga e na descarga em cada *string* que integra o *pack*, através de sensores de efeito Hall bidirecionais. Estes fornecem um sinal de tensão aos seus terminais (tipicamente de 0V a 5V ou de -12V a 12V) proporcional à corrente que os atravessa (Figura 5-3.a). Este método tem uma instalação simples e elevada precisão, mesmo sob condições extremas, permitindo ser facilmente calibrado [25].

A corrente pode também ser medida utilizando resistências de elevada precisão (Figura 5-3.b). Nestas, o valor de corrente é deduzido a partir da queda de tensão aos seus terminais. O facto de o circuito de amplificação do sinal ser externo ao sensor condiciona a sua aplicação, estando sujeito à interferência de ruídos. Embora aplicável, não exhibe a mesma flexibilidade e precisão da solução anterior.

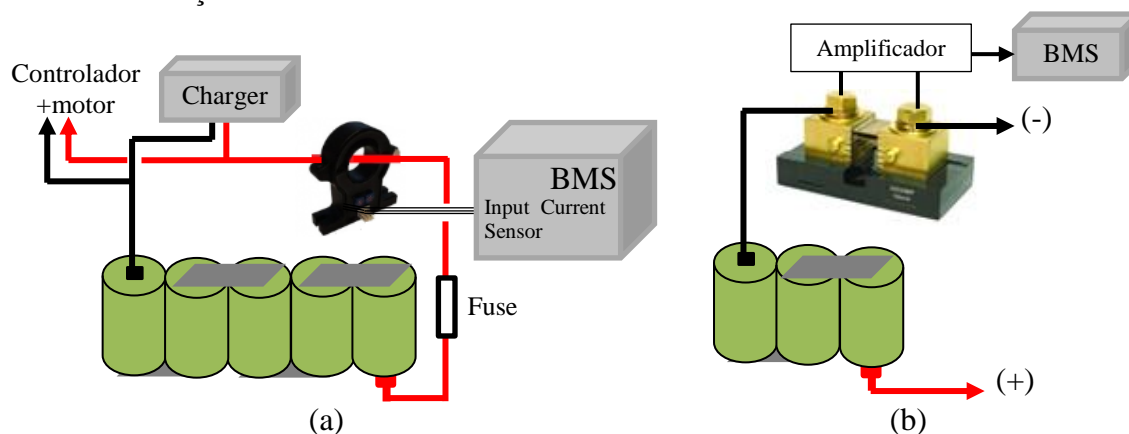


Figura 5-3: Medição da corrente com (a) sensor de efeito Hall e (b) resistência calibrada (b).

Medição da temperatura

A medição da temperatura é fundamental para o prolongamento da vida útil de uma bateria. Em aplicações portáteis onde a temperatura exterior não é controlável, a carga e a descarga da bateria podem ser interrompidas se não estiverem cumpridos os limites de SOA das células. A leitura deste parâmetro permite ainda prever possíveis falhas devido a uso abusivo das células, a problemas de origem externa ou a detecção de células danificadas, exibindo temperaturas elevadas.

Um sensor IC¹ integrado na *cell board* mede sua temperatura (Figura 5-1). Este exibe um sinal de tensão que diminuiu com o aumento da temperatura, tipicamente para uma faixa de tensão entre 1.88 V a -40°C e 0.86 V a 85°C [25].

5.1.2 Proteção das células

O BMS implementa a proteção do *pack* de células, impedindo que estas operem fora da SOA com base na monitorização dos valores instantâneos e das condições limite para a variação da tensão, corrente e temperatura. A Figura 5-4 mostra a SOA típica de uma célula de iões de Lítio para a carga e a descarga.

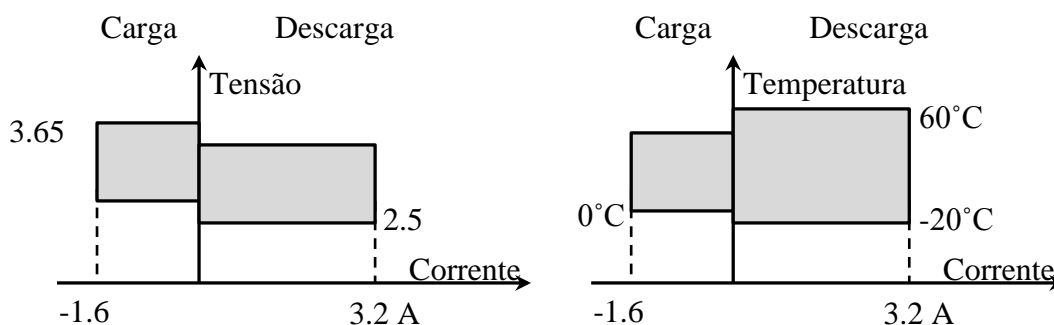


Figura 5-4: SOA típica da tensão e temperatura de uma célula de iões de Lítio em função da corrente de carga e de descarga. Fonte: adaptada de [25].

Os BMS mais simples interrompem a corrente quando atingidos os limites mínimos ou máximos da SOA (controlo *on-off*). Outros, mais sofisticados, emitem um pedido para a redução da corrente à medida que a operação de uma célula se aproxima destes limites. Nesta secção apenas é analisada a segunda alternativa, por ser a mais adequada para aplicações automóveis.

O pedido de redução da corrente é efectuado através do envio de sinais que limitam o valor da corrente de carga, *Charge Current Limit* (CCL), ou de descarga, *Discharge Current Limit* (DCL) e expressam-se em percentagem do valor máximo de corrente admissível (Figura 5-5). Quando as condições de operação de uma célula se aproximam dos seus limites de operação segura (SOA), o BMS reduz o valor do sinal que solicita a redução da corrente de carga ou de descarga, mediante a condição que for mais crítica ao funcionamento da bateria. Se o pedido de redução da corrente para temperatura for superior ao da tensão e da corrente, o BMS envia o CCL ou o DCL calculado para a temperatura, ficando assim salvaguardadas as restantes condições. Na saída do BMS é gerado um sinal de tensão, tipicamente entre 0V a 5V, proporcional ao valor da corrente que deve ser reduzida.

¹ Um sensor IC é um circuito integrado projetado para operar como sensor de temperatura que fornecer uma resposta em tensão linear à temperatura.

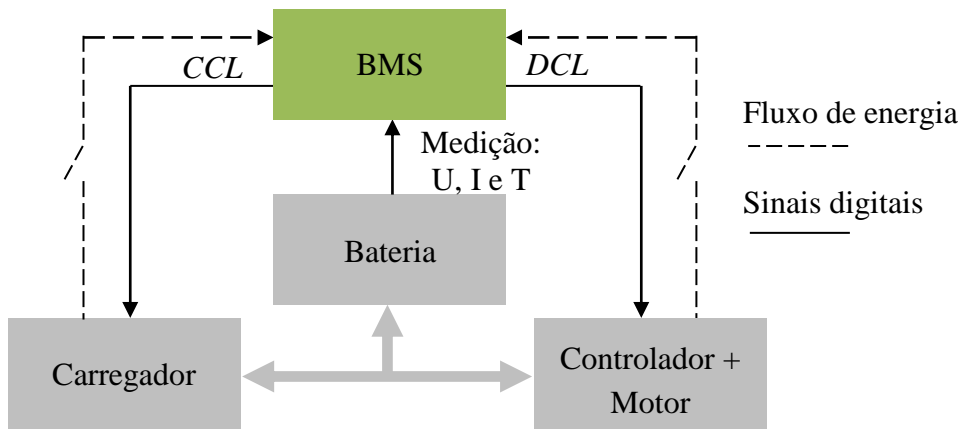


Figura 5-5: Monitorização e controlo da SOA das células na carga e na descarga.
 Fonte: adaptada de [48].

O BMS determina o CCL com base na tensão e temperatura das células e na corrente de carga da bateria, de acordo com a Figura 5-6. Quando a célula de maior tensão excede um determinado limite, o BMS reduz o CCL à medida que a tensão aumenta até ao ponto de fim de carga (a). Neste ponto o CCL é zero e um outro sinal (HLIM) é colocado no estado *high*, inibindo a carga. Numa primeira fase o BMS pode inibir a carga se a temperatura de uma célula for demasiado alta ou baixa para mante-la dentro da sua SOA (b). Se as condições de temperatura da célula o permitirem é possível alcançar a faixa de temperatura de funcionamento, diminuindo ou aumentando o CCL, ou através do sistema de gestão térmica. A corrente de carga da bateria é determinada para o CCL que for mais limitativo (c). Um pedido para o aumento da corrente pode também ser solicitado para aumento da temperatura das células ou para habilitar a carga da bateria.

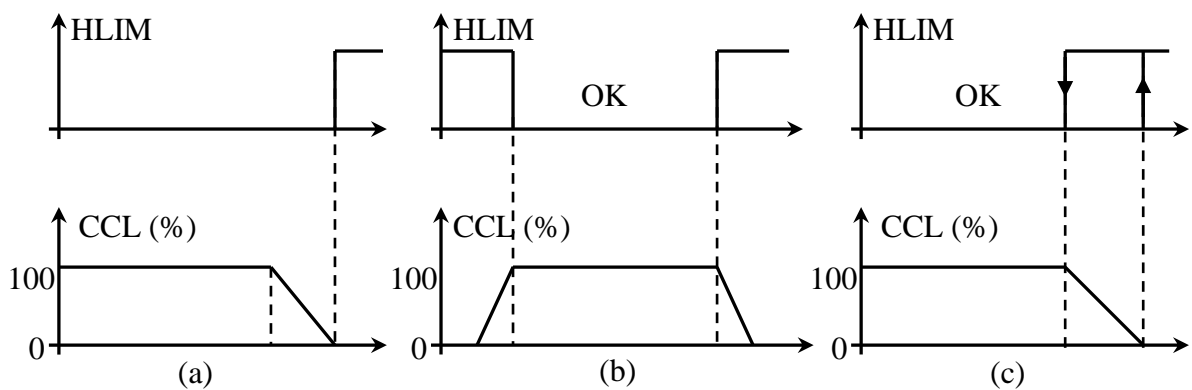


Figura 5-6: CCL baseado na tensão (a) e temperatura (b) de uma célula e na corrente de descarga da bateria (c). Fonte: adaptada de [25].

Na descarga, o BMS determina o DCL de forma similar (Figura 5-7). É de salientar que para a condição de tensão o DCL é calculado para célula de menor tensão.

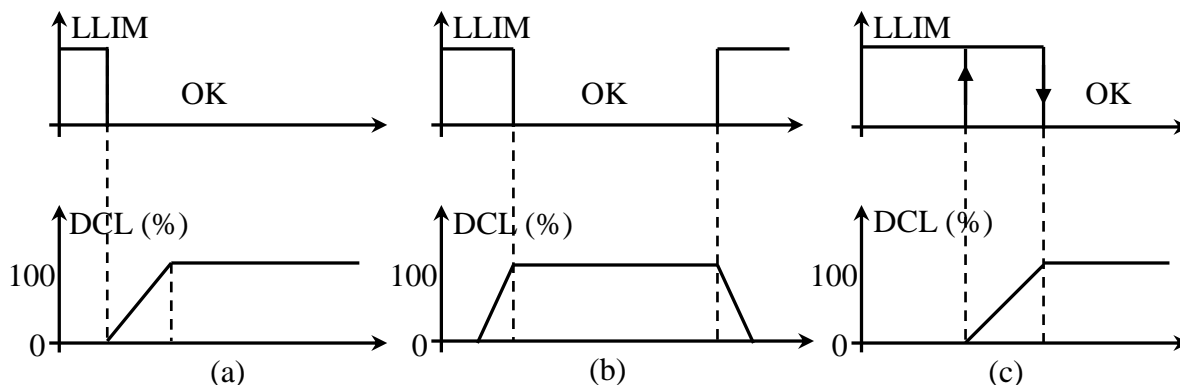


Figura 5-7: DCL baseado na tensão (a) e temperatura (b) de uma célula e na corrente de descarga da bateria (c). Fonte: adaptada de [25].

Num veículo eléctrico, sobretudo durante a aceleração quando os níveis de tensão, corrente e temperatura se aproximam rapidamente dos limites, a resposta do BMS é geralmente sentida pela limitação do binário. Neste tipo de aplicações o BMS deve ser capaz de distinguir uma corrente de pico do seu valor contínuo, por a forma a evitar a interrupção prematura da corrente de descarga e de carga, como por exemplo na travagem regenerativa. Para atrasar a reação da corrente de pico, o BMS calcula o CCL com base na média de tensão para um intervalo de 10 a 30 segundos (Figura 5-8). Caso o valor de tensão exceda por mais de 30 segundo o limite superior, a carga é interrompida. Repare-se que, nestas situações, o CCL não pode ser calculado a partir da corrente, pois este interrompia de imediato a carga da bateria.

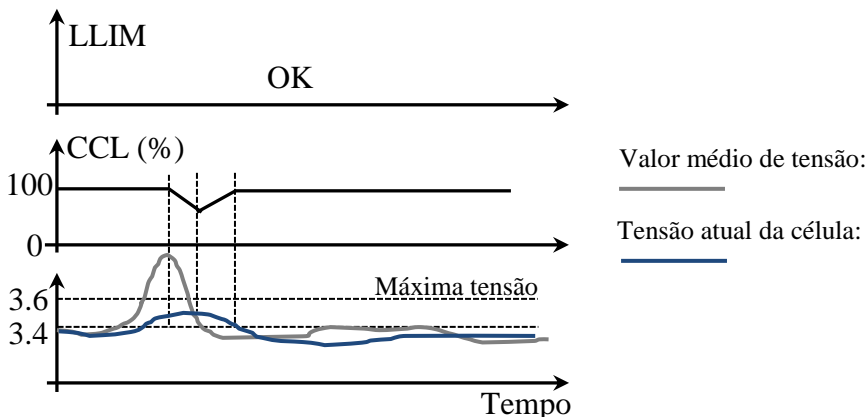


Figura 5-8: Valor médio de tensão da célula de maior tensão. Fonte: adaptada de [25].

5.1.3 Gestão térmica

Conhecida a temperatura do *pack*, o BMS pode implementar o controlo térmico, diminuindo ou aumentando a libertação de calor ou, a sua remoção, consoante a necessidade por forma a manter a temperatura dentro dos limites da SOA. O objectivo é garantir uma distribuição uniforme da temperatura, maximizando o desempenho e o tempo de vida útil das células. O BMS realiza periodicamente a monitorização das condições de temperatura, caso falhem são

acionados os dispositivos de controlo térmico, tais como, aquecedores ou ventiladores, ou bombas de calor para remover o calor em excesso (Figura 5-9).

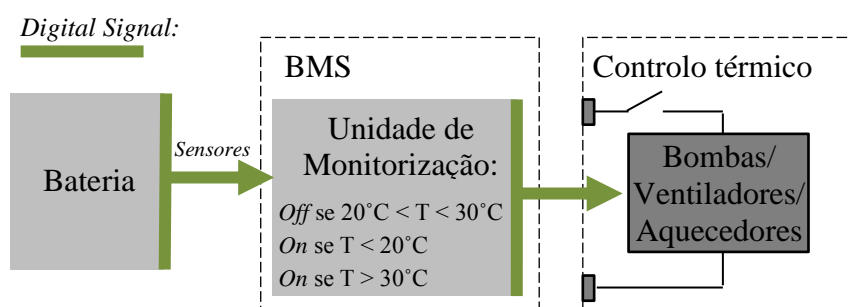


Figura 5-9: Sistema de gestão térmica.

Nem todos os BMS implementam esta função. A redução ou o aumento da corrente em ambientes de temperaturas amenas pode ser suficiente para assegurar a temperatura de operação do *pack* dentro da faixa óptima. Em aplicações automóveis é essencial que o BMS integre esta função. A quantidade de energia disponibilizada pelas células de iões de Lítio é fortemente afectada pelas baixas temperaturas, refletindo-se no desempenho e autonomia do veículo.

5.1.4 Balanceamento das células (equalização da carga)

Uma vez garantidas as condições de proteção do *pack*, o BMS procede ao balanceamento da carga. Mas, é necessário compreender qual a importância de uma distribuição uniforme da carga.

Numa série de células existem pequenas diferenças de tensão devido às variações de resistência interna e às condições em que operam, que tendem a ser ampliadas em cada ciclo de carga e descarga. Como consequência, são originados desequilíbrios do estado de carga entre células, refletindo-se numa diminuição gradual da capacidade de armazenamento e da performance do *pack*.

Na carga, as células com maior capacidade não chegam a ser totalmente carregadas (Figura 5-10.a). O carregamento é interrompido, assim que o somatório da tensão de todas as células for igual à tensão de alimentação da carga (por exemplo, do controlador do veículo). Na descarga, as células de menor capacidade limitam o fornecimento de energia à carga e a energia armazenada nas células de maior tensão fica por utilizar (Figura 5-10.b). Como consequência, exibem capacidades cada vez mais baixas, até que eventualmente falhem causando uma avaria prematura da bateria.

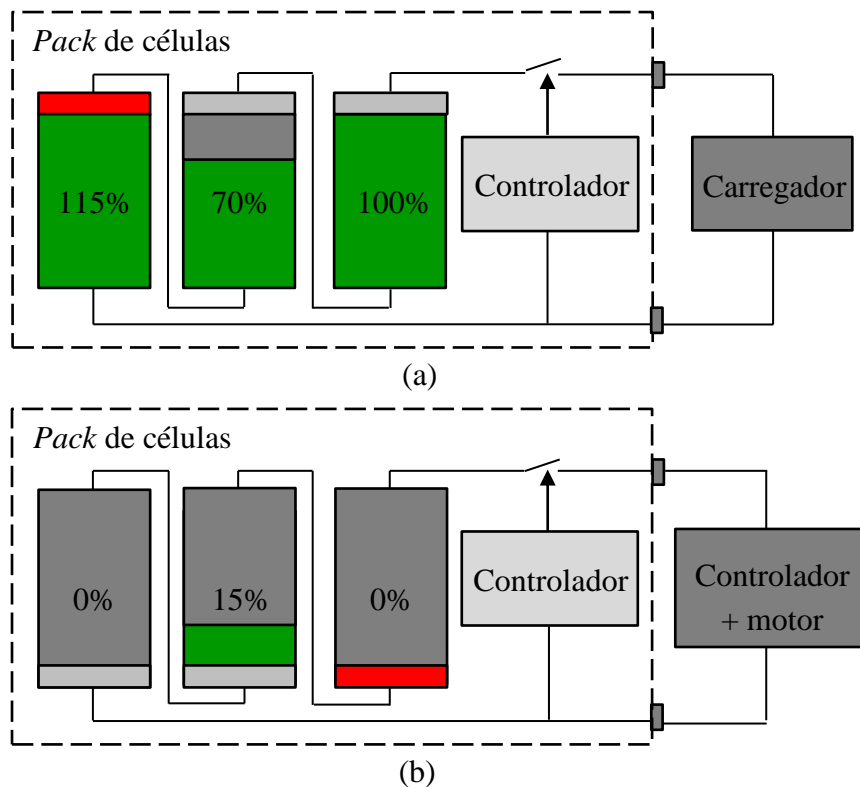


Figura 5-10: Estado da capacidade de um *pack* de células na (a) carga e na (b) descarga plena. Fonte: adaptada de [49].

O balanceamento tem como objectivo igualar a carga de cada célula a fim de maximizar a capacidade de armazenamento e vida útil da bateria. A maioria das aplicações dispensa do balanceamento na descarga, que eventualmente resulta do equilíbrio já estabelecido na carga, além disso, concentra menores riscos à segurança do *pack*, pois em caso de uma falha as células simplesmente deixam de funcionar.

De acordo com a Figura 5-11, o balanceamento pode ser passivo ou ativo. No método passivo o excesso de energia de uma célula mais carregada é dissipada sob a forma de calor através de uma resistência, permitindo que as menos carregadas possam receber mais carga. No método ativo é transferida energia das células mais carregadas para as células menos carregadas. Este método pode ser implementado de diferentes formas, consoante o elemento ativo utilizado para o armazenamento de energia, podendo ser com condensadores, ou com bobinas isoladas ou em transformadores.

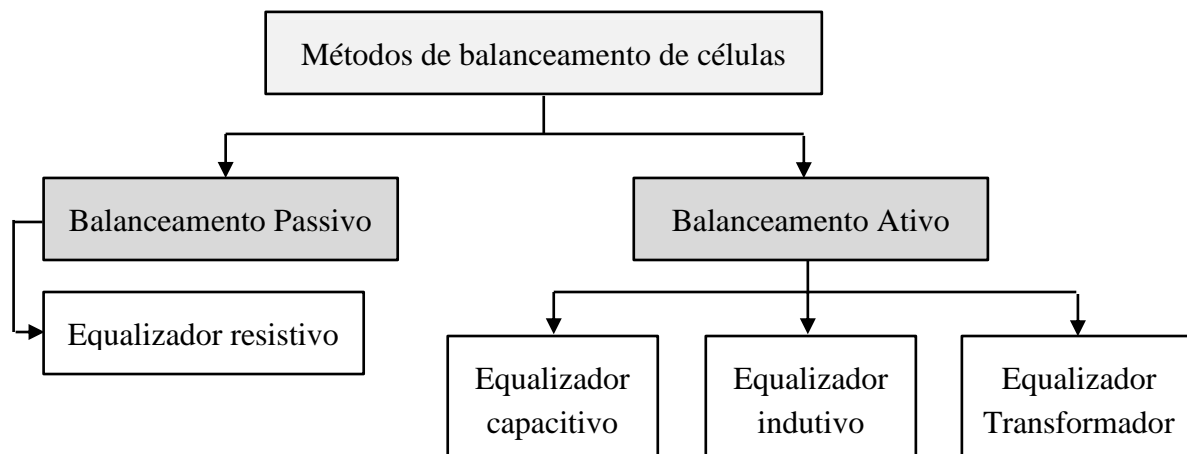


Figura 5-11: Métodos de balanceamento passivo e ativo.

São a seguir analisados os circuitos equalizadores utilizados em cada um destes métodos.

Equalizador passivo

O balanceamento passivo consiste no uso de uma resistência ligada em paralelo com a célula de maior tensão que, quando ligada, dissipa o excesso de energia armazenada sob a forma de calor até que a tensão (capacidade) desta se iguale ao nível da célula de menor tensão (Figura 5-12). A energia dissipada por efeito de Joule é dada por $E = R \cdot I^2 \cdot t$. A célula de maior tensão é detectada pelo BMS que analisa periodicamente as condições de equilíbrio. Quando estas falham, o circuito BMS IC identifica a resistência correspondente a ligar através do controlo de *switches*/relés associados.

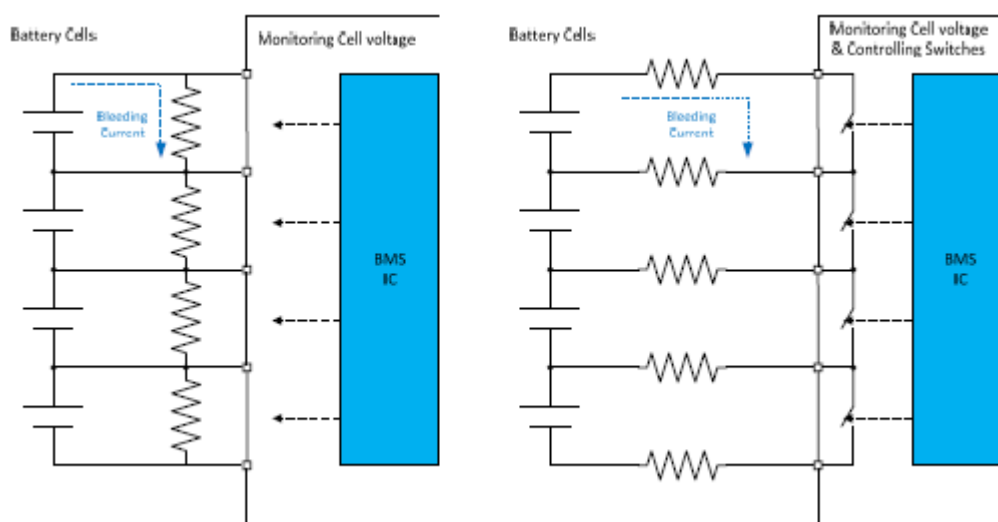


Figura 5-12: Circuito típico de um equalizador resistivo [49].

Este método exhibe baixos custos, uma implementação simples e fiável. Contudo, requer um sistema de gestão térmica devido ao calor libertado, podendo comprometer as condições de temperatura de funcionamento do *pack*. Em aplicações que exijam correntes elevadas, pode

optar-se pelo uso de resistências de baixa potência em paralelo, por forma a facilitar o controlo térmico [25].

Neste método assume-se que células com igual tensão apresentam a mesma capacidade. Contudo isto não é verdade pois a tensão aos terminais de cada célula é menor que o seu valor interno, devido à queda de tensão provocada pela resistência interna, que é diferente de célula para célula. Apesar disso, considera-se uma aproximação fiável, podendo ser implementada por algoritmos simples. É de salientar que na proximidade do fim da curva de carga, o valor da tensão aos terminais é muito próximo da tensão interna da célula, revelando-se um bom indicador da capacidade. Em *packs* que integrem células do mesmo fabricante e do mesmo lote as variações de tensão entre células são pouco significativas.

Equalizador capacitivo

Um equalizador capacitivo utiliza condensadores comutados permitindo que a energia em excesso da célula de maior tensão possa ser transferida para o condensador, carregando-o, e depois transferida para a célula de menor tensão. À semelhança do método anterior, a unidade de BMS IC seleciona os *switches* que ligam as células em desequilíbrio ao condensador correspondente, detectadas pela unidade de monitorização do BMS. Este procedimento pode ser feito de forma repetitiva pois, só há transferência de carga das células de maior tensão para as de menor tensão.

O circuito equalizador pode apresentar duas topologias de acordo com a Figura 5-13, com um condensador ou com $n-1$ condensadores para n células.

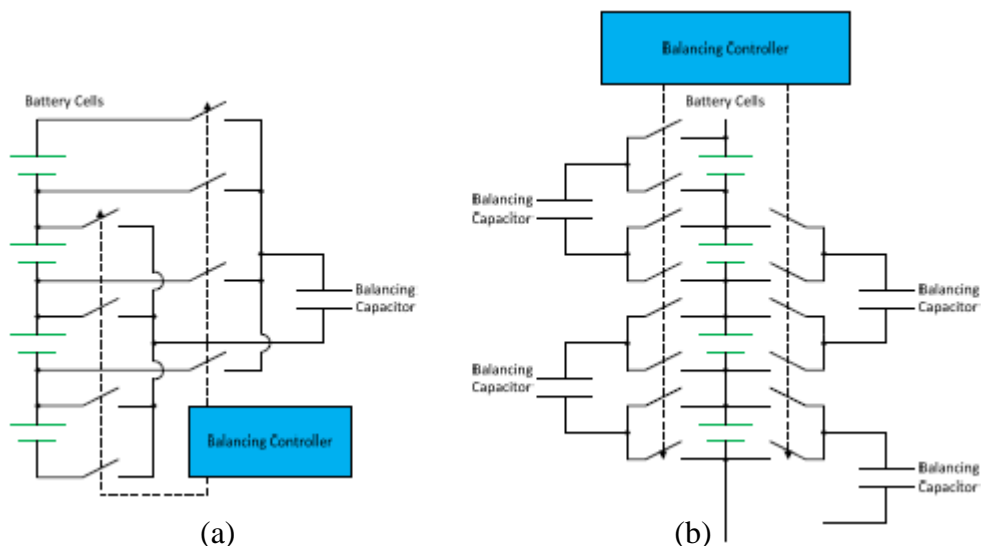


Figura 5-13: Circuito típico de um equalizador capacitivo de (a) um condensador ou de (b) múltiplos condensadores [49].

Equalizador indutivo

Num equalizador indutivo a energia da célula mais carregada é transferida para uma bobina e depois desta para uma célula menos carregada, através de conversores DC-DC bidirecionais. Este equalizador pode exibir duas topologias de acordo com a Figura 5-14.

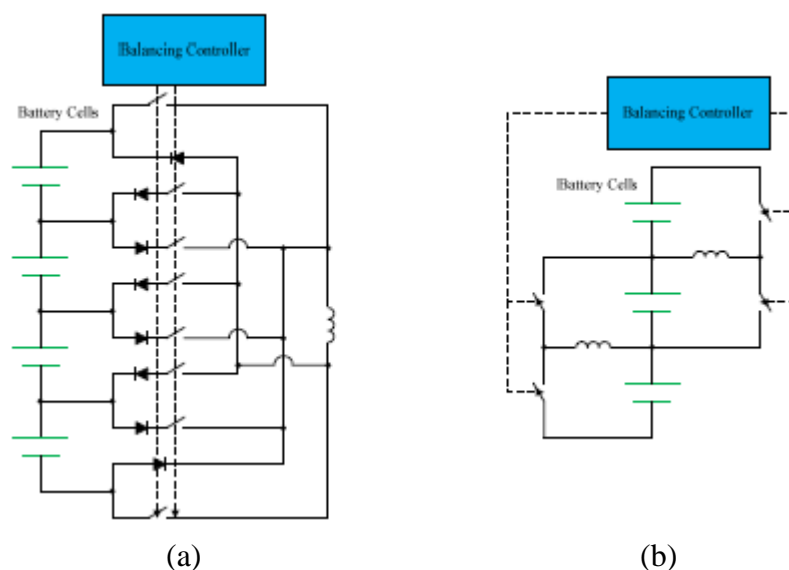


Figura 5-14: Circuito típico de um equalizador indutivo (a) com um indutor ou (b) com múltiplos indutores (b) [49].

Este método é muito rápido, pois atua como uma fonte de corrente ao contrário do equalizador capacitivo, que atua como uma fonte de tensão. Contudo é mais caro e complexo, restringindo-se a gamas específicas [25].

Equalizador transformador

Um equalizador transformador é também um método indutivo e pode utilizar diversos conversores de energia, contudo, é analisado apenas o conversor *flyback*, considerado o método mais eficiente de balanceamento ativo. A Figura 5-15 ilustra um conversor *flyback* típico com um enrolamento ou múltiplos enrolamentos. Nestes a energia das células mais carregadas é armazenada no conversor e em seguida distribuída pelas células menos carregadas através do enrolamento secundário. O facto de o balanceamento ocorrer em simultâneo em todas as células permite que o equilíbrio possa ser atingido num tempo muito curto [25].

Porém, este método é mais caro e requer que todos os acoplamentos indutivos apresentem características muito próximas, difíceis de conseguir com produções em massa.

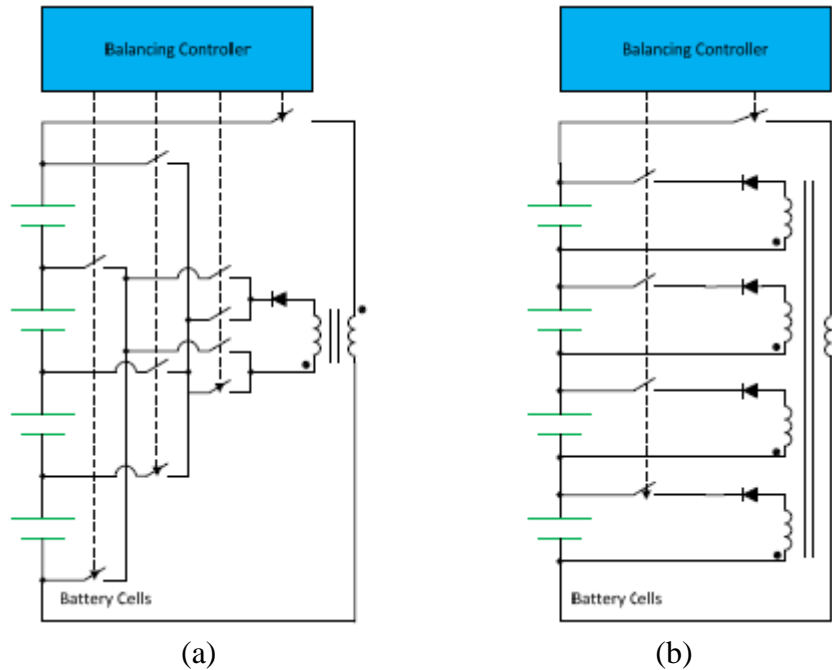


Figura 5-15: Circuito típico de um equalizador indutivo de (a) um indutor ou (b) de múltiplos indutores [49].

5.1.5 Determinação dos estados da bateria

O BMS é utilizado também para fornecer informações acerca do estado da bateria, nomeadamente dos parâmetros:

- Estado de Carga ou *State of Charge* (SoC) – que indica o estado de carga da bateria relativamente à energia disponível quando completamente carregada e expressa-se em valor percentual;
- Profundidade de Descarga ou *Depth of Discharge* (DoD) – que indica a quantidade de energia que foi já descarregada da bateria e expressa-se em valor percentual ou em Ah;
- Estado de Saúde ou *State of Health* (SoH) – que fornece informações sobre o “estado de saúde” do *pack* de células com base nas condições para que foi projetada e expressa-se em valor percentual. O aumento da resistência interna, o envelhecimento das células, a diminuição da capacidade, o número de ciclos de carga/descarga e a taxa de auto-descarga são determinantes para o cálculo do SoH. Este parâmetro permite estimar o tempo de vida útil da bateria para uma dada aplicação, assim como a necessidade de manutenção [25].

5.1.6 Comunicação

Para que o BMS possa comunicar com as unidades que integram o veículo eléctrico, como carregador, inversor e sistema de gestão térmica de controlo dos parâmetros críticos de operação, é necessário que disponha de uma interface com os mesmos. Geralmente esta é implementada recorrendo a interligações com cablagem ou a uma rede digital (CAN Bus), dependendo da tecnologia do BMS. Em aplicações automóveis a infra-estrutura de

comunicações permite ainda a ligação a sistemas periféricos, como *display's* para que o utilizador possa aceder ao histórico e às configurações dos parâmetros de controlo da bateria e proceder a diagnósticos e a funções de testes. A comunicação é estabelecida através de uma porta *RS232* ou ligação *USB*.

5.2 Arquiteturas dos sistemas e gestão da bateria

Um BMS pode ser implementado com topologia centralizada, modular, *master-slave* e distribuída.

5.2.1 Topologia centralizada

Na topologia centralizada (Figura 5-16.a) todas as células são ligadas a um único BMS responsável por todas as funções. Esta configuração é de fácil manutenção, uma vez que dispensa uma infra-estrutura de comunicações mas, revela-se complexa, devido ao elevado número de ligações.

5.2.2 Topologia modular

A topologia modular é formada por múltiplas unidades de controlo (módulos do BMS), iguais, que medem os parâmetros tensão e temperatura de um agrupamento de células (Figura 5-16.b). Estas implementam a monitorização da tensão e temperatura e comunicam com o módulo mestre sobre o estado de cada célula, que por sua vez aciona os meios necessários para a proteção da bateria.

A principal vantagem desta topologia é a capacidade de expansão do sistema, podendo-se adicionar módulos, com um manuseamento facilitado da cablagem. Contudo, é mais cara que a topologia centralizada. Em muitos sistemas é frequente optar-se pela instalação de mais módulos para garantir uma ação mais localizada das células a monitorizar mesmo que as entradas de outros permaneçam por utilizar.

5.2.3 Topologia *master-slave*

Esta topologia é similar à modular, com exceção de que o mestre é diferente dos outros módulos, que neste caso são denominados de escravos (Figura 5-16.c). Estes são responsáveis pela monitorização e controlo da tensão das células a que estão ligados, enquanto o mestre gere e comunica com todo o sistema o estado da bateria. A topologia *Master-Slave* não se distingue em nenhum outro aspecto da topologia Modular, sendo apenas de referir que o custo de um módulo escravo é mais baixo do que o de um *master*.

5.2.4 Topologia distribuída

Na topologia distribuída cada célula contém um circuito integrado de medição (escravo) responsável pela medição da tensão e da temperatura. Na unidade de controlo (mestre) é realizado o processamento da informação recolhida em cada célula, assim como as funções de comunicação e proteção. A comunicação com o mestre é estabelecida através de um barramento de dados que interliga os nós de todos os escravos (Figura 5-16.d).

Esta topologia exhibe uma concepção simples e construção de grande fiabilidade requerida no sector automóvel. Como envolve um menor número de ligações é mais robusta uma vez que minimiza a interferência de ruídos no sinal. Porém, como requer uma placa de circuito por célula torna-se mais cara e de difícil processamento para um só mestre.

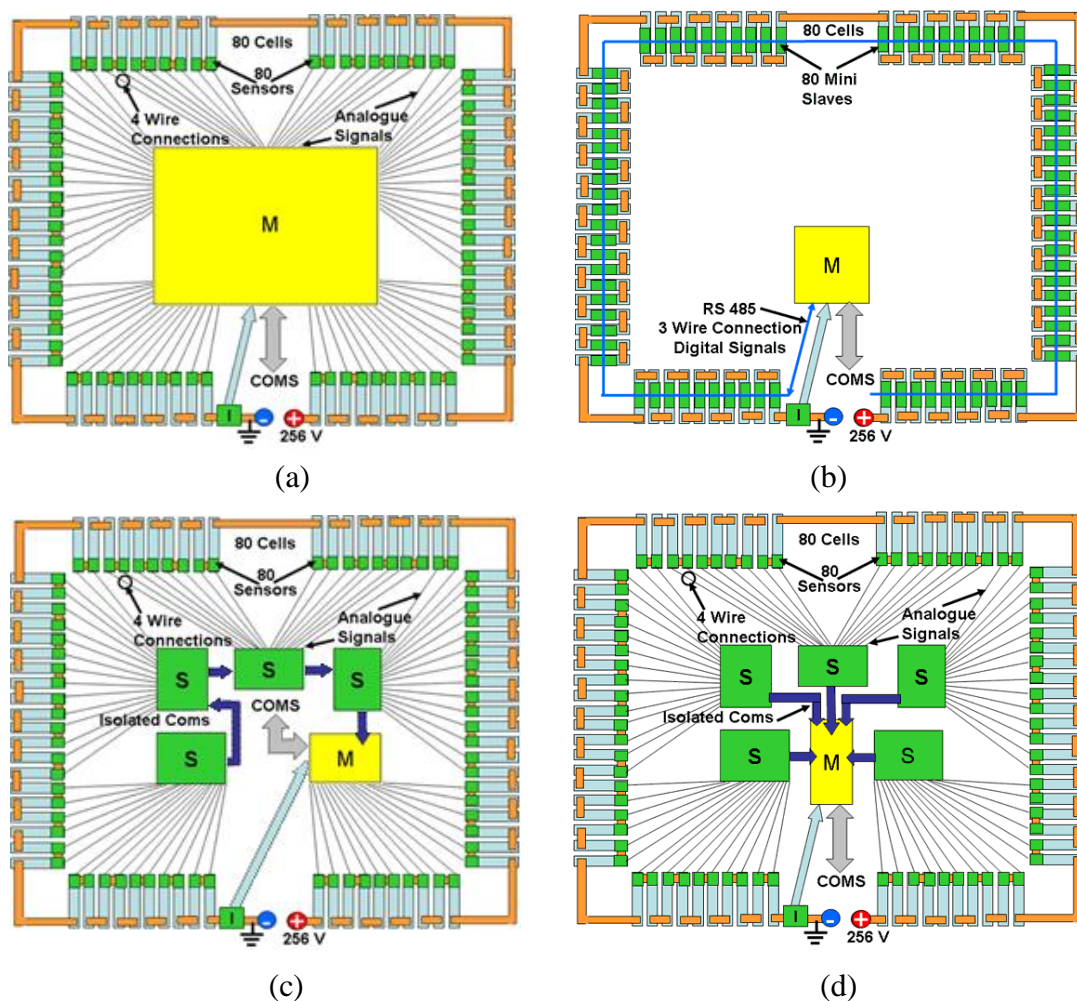


Figura 5-16: Topologia (a) centralizada, (b) modular, (c) *master-slave* e (d) distribuída.
Fonte: adaptada de [46].

5.3 Questões práticas do projeto

A escolha de um BMS está condicionada à topologia que for mais adequada e devem ser ponderados factores como a fiabilidade requerida para o sistema, o número de células a controlar e o seu tipo, a fim de assegurar o melhor desempenho possível.

Existe hoje oferta diversificada de soluções, contudo, no que respeita à aplicação em causa o mercado é mais restrito devido às exigências de segurança que são colocadas. A escolha do BMS depende também dos componentes que integram o *Power Drive* do veículo eléctrico, nomeadamente o inversor e o carregador.

Na aposta para o BMS deste projeto foi considerado a topologia distribuída. Esta revela-se mais adequada ao tipo de células utilizadas (modelo 18650), sendo mais fiável para baterias com um elevado número de células. Além disso, constituiu a solução mais utilizada em veículos eléctricos, dada a simplicidade e flexibilidade que proporciona.

6. Projeto do sistema propulsor eléctrico do veículo escolhido

Neste capítulo é exposto o veículo a electrificar, bem como os componentes que integram o seu sistema propulsor eléctrico ou *power drive*.

Com base nas especificações do fabricante do veículo e estudo exposto no capítulo 3 são conhecidas as equações das forças que se opõem ao movimento, necessárias para a formulação das equações diferenciais que permitem modelizar o seu comportamento dinâmico. São também deduzidas as equações que traduzem a potência instantânea requerida e a energia consumida em função da autonomia a alcançar, a partir da qual é estimada a capacidade da bateria (em kWh) essencial para o seu projeto que é exposto no capítulo 7.

Como se trata de um projeto académico é dada maior ênfase à qualidade, robustez e fiabilidade dos componentes em detrimento do seu custo.

6.1 Especificações do veículo a electrificar

Como foi referido no capítulo 2, a ação das forças de atrito pode ser minimizada com a escolha de um veículo com menor peso, melhor perfil aerodinâmico e pneus de baixo atrito, proporcionando uma melhor performance dinâmica e maior eficiência energética. Atendendo a estas considerações foi escolhido um Honda *Civic Coupé EX* de 1996, apresentado na Figura 6-1. Este veículo exhibe já um bom coeficiente aerodinâmico, estrutura leve e baixa área frontal, com os valores expostos no Quadro 6-1, e aparenta ainda uma construção robusta, espaço suficiente para as baterias e preço acessível.



Figura 6-1: Honda *Civic Coupé EX* de 1996.

No Quadro 6-1 expõem-se as características do veículo necessárias ao projeto de electrificação do seu sistema propulsor.

Quadro 6-1: Especificações técnicas do Honda *Civic Coupé EX*.

Parâmetros	Valores
Coeficiente aerodinâmico (C_D)	0,34
Área frontal do veículo (A_f)	1,993 m ²
Densidade do ar a 20°C ($\rho_{20^\circ C}$)	1,2 kg/m ³
Coeficiente de resistência ao rolamento (f_r)	0,0062 ¹
Tara do veículo (m)	1.127 kg
Raio da roda (r_{roda})	0,298 m
Rendimento de transmissão mecânica entre o veio do motor e as rodas ($\eta_{transmissão} = \eta_{cx.velocidades} \times \eta_{diferencial}$)	86%
Relação na caixa de velocidades – 3ª mudança (i_g)	1,25:1
Relação no diferencial (i_0)	4,25:1
Gear ratio ($G_r = i_g \times i_0$)	5,3124:1
Factor de massa (δ)	1,05 ²

Fonte: “Honda Civic 1996-2000 Service Manual”, Especificações técnicas do fabricante Honda;

¹“Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy”, Transportation Research Board, 2006;

²K. Young et al; “Electric Vehicle Battery Technologies”, Springer Science, 2013.

Devido à falta destas especificações por parte do fabricante e tendo por base nos valores típicos disponibilizado na literatura foi considerado um rendimento de 92% para o diferencial e de 94% para a caixa de velocidades (na 3ª relação) [50].

6.2 Modelização cinemática do veículo

A partir dos dados expostos no Quadro 6-1 são deduzidas as expressões das forças de resistência ao movimento que interagem com o veículo, como descrito em 3.1.

Força de resistência ao rolamento:

$$F_r = m \cdot 9,8 \cdot 0,0062 \cdot \cos(\theta) = 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) \text{ (N)} \quad (6-1)$$

Força de resistência aerodinâmica:

$$F_D = 1/2 \cdot 1,2 \cdot 1,993 \cdot 0,34 \cdot v^2 = 0,406572 \cdot v^2 \text{ (N)} \quad (6-2)$$

Força gravítica:

$$F_i = 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} \text{ (N)} \quad (6-3)$$

Força de inércia:

$$F_g = 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta) \text{ (N)} \quad (6-4)$$

Da soma das equações anteriores é possível determinar a força motriz que deve ser aplicada às rodas para que o veículo se desloque com uma determinada velocidade num dado instante. Esta força é obtida pela equação (6-6) para uma dada massa do veículo, m , e inclinação do pavimento, θ .

$$F_{motora} = F_r + F_D + F_g + F_i \text{ (N)} \quad (6-5)$$

$$F_{motora} = 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v(t)^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta) \text{ (N)} \quad (6-6)$$

6.3 Modelização da potência requerida

A potência mecânica desenvolvida nas rodas para impulsionar o veículo com uma dada velocidade é obtida pela equação (6-7).

$$P_{mec}(t) = v(t) \cdot \left(0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v(t)^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta) \right) \quad (6-7)$$

onde,

P_{mec} → Potência mecânica entregue às rodas num dado instante t (W);

v → Velocidade do veículo nesse instante t (m/s).

Dividindo este valor pelo rendimento de transmissão ($\eta_{transmissão}$) obtém-se a equação (6-8), que traduz a potência que o motor eléctrico deve entregar ao sistema de transmissão, num dado instante, a essa velocidade.

$$P_{motor} = \frac{v(t)}{\eta_{transmissão}} \left(0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta) \right) (W) \quad (6-8)$$

Considerando η_c o rendimento do conjunto controlador+motor, têm-se a equação da potência eléctrica fornecida pela bateria nesse instante.

$$P_{eléctrica} = \frac{v(t)}{\eta_c \cdot \eta_{transmissão}} \left(0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta) \right) (W) \quad (6-9)$$

6.4 Modelização do consumo energético

A energia consumida é calculada pela integração da potência eléctrica debitada pelas baterias num determinado intervalo de tempo, de acordo com a equação (6-10).

$$E = \frac{1}{3600} \int_{t_0}^{t_1} P_{eléctrica} \cdot dt \quad (6-10)$$

onde,

$E \rightarrow$ Energia eléctrica fornecida pelas baterias (Wh);

$P_{eléctrica} \rightarrow$ Potência eléctrica fornecida pelas baterias num dado instante t (W).

6.4.1 Estimativa do consumo energético para uma dada autonomia

Para o projeto de electrificação do veículo necessitamos de estimar a quantidade de energia a armazenar na bateria que proporcione uma autonomia próxima da de outros veículos eléctricos similares, deslocando-se à velocidade máxima de circulação.

Tendo estas considerações presentes estipulou-se que o veículo se desloca no plano horizontal à velocidade 120 km/h, com uma autonomia de 100 km e uma massa de 1.197 kg, correspondente à tara do veículo mais um condutor de 70 kg. Neste estudo despreza-se o artito de inércia (linear e angular). A componente gravítica tem também ação nula, visto que o veículo se desloca numa superfície horizontal.

A força que é necessário aplicar para manter o veículo à velocidade de 33,33 m/s (120 km/h) é dada por:

$$F_{motora} = 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v^2 = 72,73 + 451,75 = 524,48 N$$

A potência eléctrica fornecida pela bateria ao sistema propulsor é:

$$P_{eléctrica} = \frac{v}{\eta_c \cdot \eta_{transmissão}} \times F_{motora} = \frac{33,33}{0,77 \times 0,86} \times 524,48 = 26,25 \text{ kW}$$

onde,

$\eta_c = 0,77 \rightarrow$ Eficiência do motor e do controlador seleccionados (em 6.5.1 no Quadro 6-3).

Em regime estacionário, a energia consumida pode ser obtida pelo produto da potência fornecida pela bateria com o tempo decorrido. A energia total consumida para uma autonomia de 100 km à velocidade de 120km/h é:

$$E = P_{eléctrica} \cdot \Delta t = 26,25 \text{ kW} \times 0,83 \text{ h} = 21,88 \text{ kWh}$$

Concluiu-se assim que, para o veículo alcançar a autonomia desejada, a bateria deverá poder libertar um valor igual ou superior a 21,88 kWh.

6.5 Seleção dos componentes a integrar o *Power Drive* eléctrico

A electrificação do sistema propulsor do veículo assenta na escolha dos componentes expostos na Figura 6-2. Com excepção da bateria, que será alvo de estudo detalhado no capítulo 7, descrevem-se nas secções seguintes os factores que fundamentam a escolha dos componentes.

A remoção do motor de combustão envolveu também a adaptação de alguns sistemas para que fossem acionados electricamente na arquitetura mantida do veículo original.

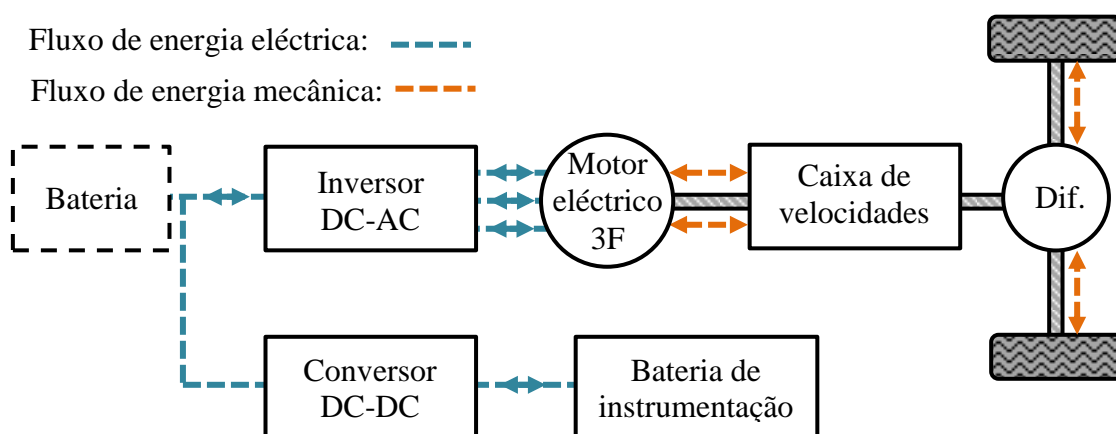


Figura 6-2: Diagrama do *Power Drive* eléctrico do veículo.

6.5.1 Motor + Controlador

Pode hoje encontrar-se no mercado uma diversidade de soluções de motor/controlador, contudo nem todas servem para este projeto. No sentido de justificar a escolha são expostas no Quadro 6-2 as principais características dos motores considerados para o projeto de electrificação do Honda. A opção recaiu desde o início nas alternativas com tecnologia de indução ou síncrona com ímãs permanentes (PMSM).

Quadro 6-2: Principais características dos motores estudados [51], [52], [53] e [54].

Modelo do motor	<i>Zytek IDT</i>	<i>Remy</i>	<i>UQM</i>	<i>Curtis</i>
Tipo	PMSM	Indução	PMSM	Indução
Binário máximo (N.m)	300	275	240	160
Velocidade máxima (r.p.m)	8.000	11.000	8.000	8.000
Potência máxima (kW)	70	40/60	75	50
Tensão de operação	180 - 325	200/300	240 - 420	72-130
Peso (kg)	105	83	41	52
Refrigeração	Água	Água	Água	Ar
Controlador	Incluído	Não incluído	Incluído	Incluído
Preço (€)	-	-	21.332,96	5.830,00

A partir dos valores do Quadro 6-2 e com base na descrição do fabricante constata-se que:

- Os motores da *Zytek* e da *Remy* apesar de evidenciarem uma performance elevada destinam-se a aplicações que exigem elevado poder de tração (transporte de passageiros, comerciais e carros desportivos) estando por isso descontextualizados do perfil pretendido para o veículo a projetar. Além disso são mais pesados que os motores da *UQM* e da *Curtis* factor que, como vimos, condicionam o desempenho dinâmico do veículo.
- O motor da *UQM* exibe um binário de arranque elevado e baixo peso, contudo revela-se uma solução com custo proibitivo.

Para o veículo em transformação foi escolhido o motor *Curtis* de 50 kW, apresentado na Figura 6-3 [55].



Figura 6-3: Motor *Curtis 1238-7601 HPEVS* [54].

O fabricante propõe para este motor um controlador *Curtis 1238-7601 HPEVS* exibido na Figura 6-4. A maioria dos fabricantes oferece um par motor/controlador constituindo uma solução previamente adaptada, no que se refere à frequência, tensão e corrente máxima absorvida. Apesar de terem sido consideradas outras opções, optou-se pelo controlador recomendado pelo fabricante para este motor.



Figura 6-4: Controlador *Curtis 1238-7601 HPEVS* [56].

No Quadro 6-3 expõem-se as principais características deste conjunto. As especificações de entrada do conversor como tensão nominal, potência e máxima corrente constituem os parâmetros para o projeto da bateria.

Quadro 6-3: Principais características do motor + controlador *Curtis 1238-7601* [54] e [56].

Parâmetros	Valores
Potência nominal	50 kW
Tensão alimentação no barramento DC	72 – 130 V
Máxima corrente absorvida	650 A
Tipo de refrigeração do motor	Ar
Tipo de refrigeração do controlador	Água
Peso do «controlador + motor»	5,45 + 52 kg
Eficiência energética do motor	88 %
Eficiência energética do controlador	88 %

A Figura 6-5 exhibe o acoplamento do motor ao controlador e flange de acoplamento à caixa de transmissão.



Figura 6-5: Montagem do conjunto motor e controlador *Curtis* [57].

6.5.2 Sistema de refrigeração

O controlador seleccionado dispõe de uma placa de refrigeração com líquido que atua como permutador de calor, como se exhibe na Figura 6-6. Foi necessário conceber um circuito para a circulação do fluido, podendo ser vista a sua representação na Figura 6-7.

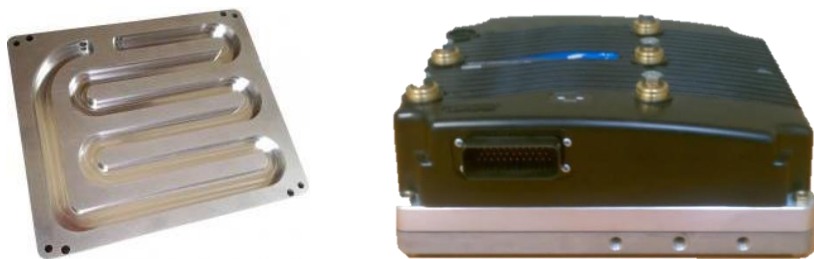


Figura 6-6: Placa de refrigeração líquida da *Curtis* [58].

Na placa de refrigeração circula um fluido que absorve o calor libertado na base do controlador e o transporta para o irradiador que por sua vez o dissipa para o exterior.

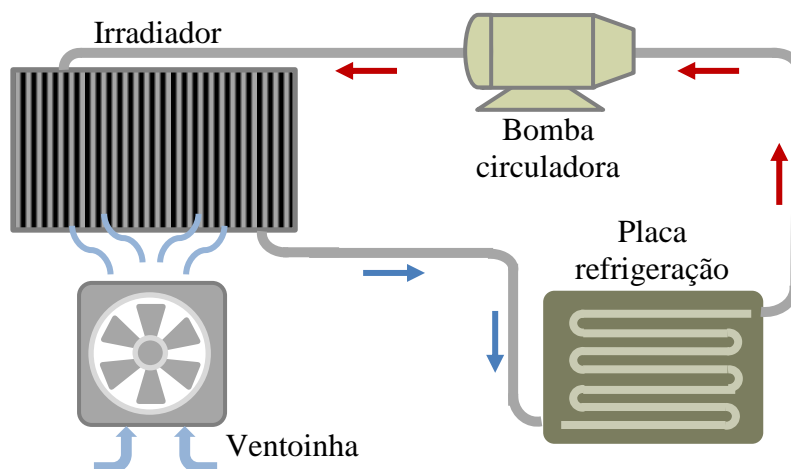


Figura 6-7: Sistema de refrigeração do controlador do veículo eléctrico.

Os componentes do sistema de refrigeração fazem parte de um *pack* constituído por um irradiador, uma bomba circuladora e duas ventoinhas acionadas por motores eléctricos de 12V DC (Figura 6-8).

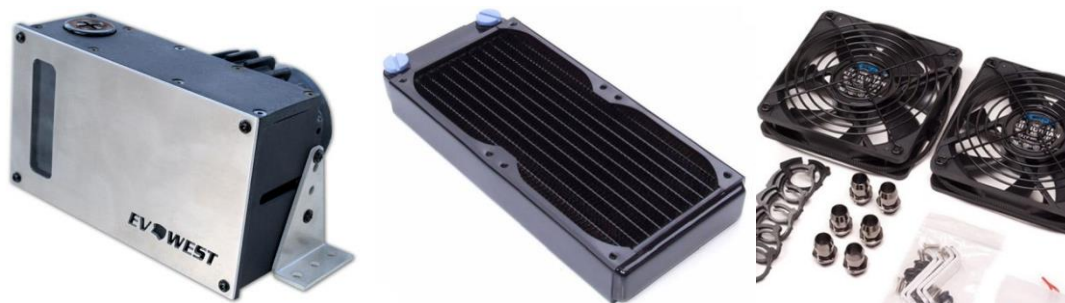


Figura 6-8: *Kit* de refrigeração *EV West* com ventilação forçada [59].

As ventoinhas são acionadas quando a ventilação natural não é suficiente e o líquido de refrigeração atinge a temperatura máxima admissível do controlador, que é de 80°C.

De acordo com as indicações do fabricante é recomendada a utilização do termóstato apresentado na Figura 6-9, previamente adaptado à placa de refrigeração escolhida, permitindo uma medição localizada. Este dispositivo incluiu um relé que comanda um contacto, que por sua vez aciona as ventoinhas quando a temperatura do fluido atinge o valor para o qual foi regulado. Este relé opera com 12 V DC, valor igual à tensão de alimentação da bomba circuladora e para uma faixa de temperatura dos 27°C aos 99°C.



Figura 6-9: Termóstato da *EV West* [60].

6.5.3 Bomba de vácuo

Devido à remoção do MCI, foi necessário introduzir uma bomba de vácuo com acionamento eléctrico para apoio do servofreio do travão. A bomba escolhida é da *SSBC*, opera com 12 V DC e tem capacidade para funcionar com pressões até 67,7 kPa de valor absoluto, suficiente para garantir a pressão adequada no circuito de travagem.



Figura 6-10: Bomba de vácuo *SSBC* (à esquerda) e *switch* (à direita) [61].

A bomba de vácuo atua no servofreio, mantido do veículo original, que por sua vez amplia e distribui a força aplicada no pedal às maxilas de travagem nas rodas, proporcionando a mesma segurança que o sistema original. Esta incluiu um sensor (*switch*) que mantém o servofreio nas condições óptimas de operação, acionado o funcionamento da bomba, quando o vácuo sobe acima de um determinado valor, conforme ilustrado na Figura 6-11.

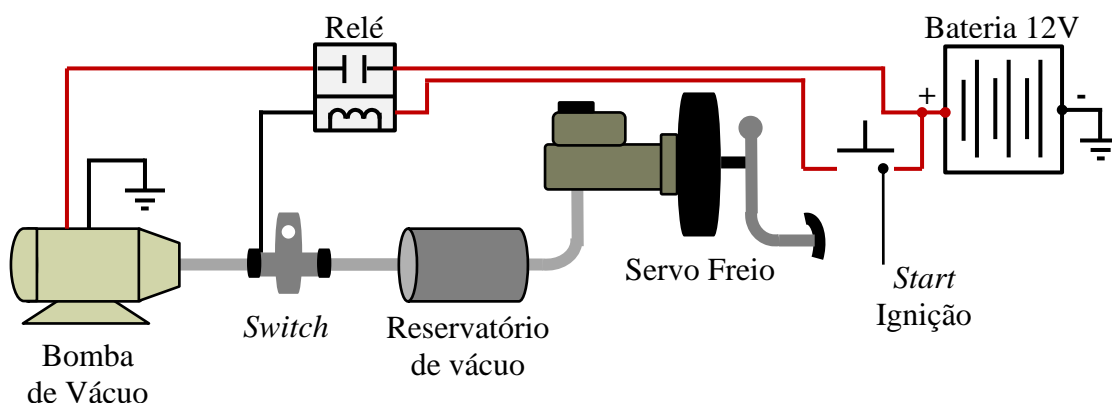


Figura 6-11: Sistema de travagem do veículo eléctrico. Fonte: adaptada de [62].

Além da bomba de vácuo, foi também necessário incluir no pedal de travagem um transdutor de pressão, como mostra a Figura 6-12. Este é recomendado pela *EV West*, para dar informação ao controlador para a travagem regenerativa. É alimentado a 5V DC pelo controlador Curtis e fornece um sinal que varia linearmente entre 0,5 V e 4,5 V, para uma gama de pressão dos 0 aos 1000 psi (dos 0 aos 69 Bar, pressão no fluido de travagem).



Figura 6-12: Transdutor de pressão de travão da *EV West* [63].

6.5.4 Pedal de aceleração

O pedal de aceleração a utilizar no veículo eléctrico é exibido na Figura 6-13. Este possui um potenciómetro que é um transdutor que permite fornecer ao controlador um sinal entre 0 a 5V DC, diretamente proporcional à posição do pedal. A alimentação de 5V DC é assegurada pelo controlador, conforme exposto na Figura 6-17.



Figura 6-13: Pedal de aceleração com potenciómetro *Evnetics Billet* [64].

6.5.5 Conversor DC-DC

Para a alimentação da instrumentação original mantida no veículo, foi escolhido um conversor DC-DC para a recarga de uma bateria auxiliar de 12 V DC, a partir da bateria de tração. É utilizado o conversor DC-DC da *Elcon*, exposto na Figura 6-14.



Figura 6-14: Conversor *Elcon TCD High Efficiency Series DC/DC* [65].

No Quadro 6-4 constam as principais especificações deste conversor.

Quadro 6-4: Características do conversor *Elcon TCD DC/DC* [65].

Parâmetros	Valores
Potência nominal	400 W
Gama de tensão de entrada	72 – 144 V DC
Corrente de entrada a 120 V	3 A
Corrente máxima de saída a 12 V	30 A
Corrente nominal de saída a 12 V	25 A
Eficiência	92 %
Peso	2,27 kg

Para a ligação do conversor devem ter-se presentes as especificações técnicas da cablagem, descritas a seguir:

- Condutor vermelho e preto - Terminal positivo e negativo, respectivamente, do lado da bateria de alta tensão.
- Condutor verde e azul - Terminal positivo e negativo, respectivamente, para a alimentação da bateria de 12 V.

O fabricante recomenda para proteção contra sobrecargas e sobreaquecimentos, a instalação de um fusível de 600 V/5 A no circuito de alimentação, e no lado da carga um fusível de 12 V – 30 A, ambos no condutor positivo.

6.6 Modelização do comportamento dinâmico do veículo

O estudo do comportamento dinâmico de um veículo implica a formulação das suas equações diferenciais. Estas permitem conhecer a velocidade instantânea em função de condições como a alteração da massa e a inclinação do plano de deslocamento e estimar o efeito das forças que nele atuam durante o deslocamento. Quando a soma das forças resistentes diminuiu, a força motora resultante nas rodas é maior e o movimento é acelerado. Se as forças de atrito aumentam, essa força é menor e a velocidade diminuiu.

As equações são deduzidas a partir da curva de binário-velocidade do motor seleccionado, exibida na Figura 6-15, e das equações que modelizam o comportamento cinemático do veículo em estudo, expostas em 6.2. Para simplificar a expressão da curva de binário, esta é linearizada em três intervalos de velocidade, como se mostra a seguir.

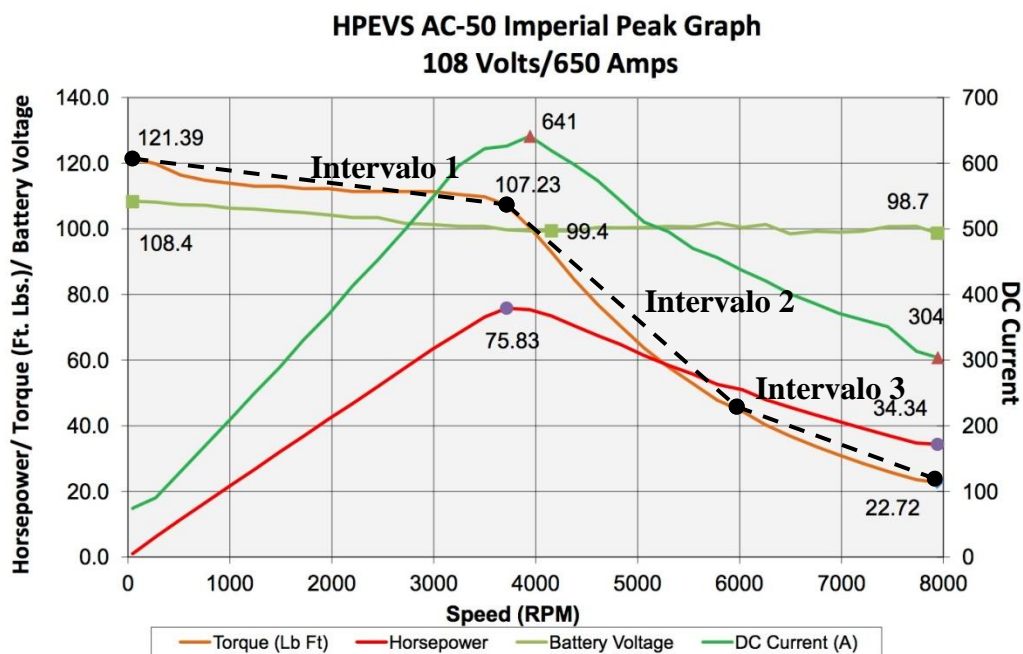


Figura 6-15: Linearização por intervalos da curva de binário [54].

A Figura 6-16 apresenta a linearização da curva nos intervalos 1 a 3, convertida em unidades do S.I.

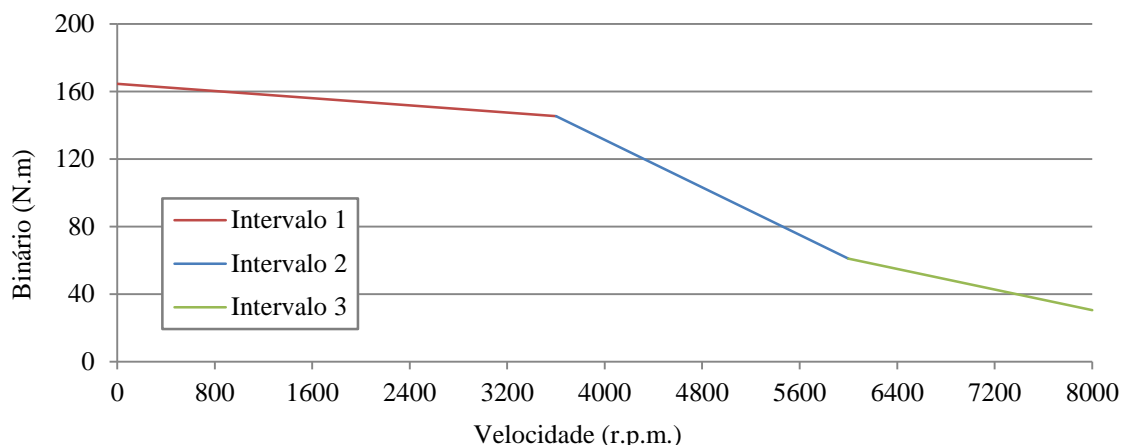


Figura 6-16: Linearização por intervalos da curva de binário em r.p.m. e N.m.

A partir da Figura 6-16 são deduzidas as equações do binário motor para cada intervalo de velocidade, como se expõem a seguir.

$$\text{Intervalo 1:} \quad B_1 = 164,58 - 0,00526 \cdot v_{rpm} \text{ (N.m)} \quad 0 < v_{rpm} \leq 3650$$

$$\text{Intervalo 2:} \quad B_2 = 276,42 - 0,035902 \cdot v_{rpm} \text{ (N.m)} \quad 3650 < v_{rpm} \leq 6000$$

$$\text{Intervalo 3:} \quad B_3 = 152,51 - 0,01525 \cdot v_{rpm} \text{ (N.m)} \quad 6000 < v_{rpm} \leq 8000$$

A partir da equação (3-29) pode conhecer-se a relação entre a velocidade no veio do motor, em r.p.m., e a velocidade das rodas, em m/s, para o veículo em estudo.

$$v_{rpm} = 170,24 \cdot v \quad (6-11)$$

Isto significa que por cada rotação no veio do motor a roda percorre uma distância de 0,0058 metros (obtida de $v = v_{rpm} \cdot 0,0058$).

Substituindo a equação (6-11) nas expressões anteriormente obtidas para B_1 , B_2 e B_3 é possível descrever o binário desenvolvido pelo motor em função da velocidade de deslocamento do veículo em m/s para cada instante da curva de binário, como se apresenta a seguir.

$$\text{Intervalo 1:} \quad B_1 = 164,58 - 0,895520 \cdot v \text{ (N.m)} \quad 0 < v \leq 21,44 \text{ m/s}$$

$$\text{Intervalo 2:} \quad B_2 = 276,42 - 6,112050 \cdot v \text{ (N.m)} \quad 21,44 < v \leq 35,25 \text{ m/s}$$

$$\text{Intervalo 3:} \quad B_3 = 152,51 - 2,596191 \cdot v \text{ (N.m)} \quad 35,25 < v \leq 46,99 \text{ m/s}$$

Da combinação das expressões de binário B_1 , B_2 e B_3 com a equação (6-6) é possível conhecer a velocidade com que o veículo se desloca num dado instante para cada intervalo da curva de binário. Como referido em 3.1, a força motora aplicada nas rodas é dada pelo quociente entre o binário motor aplicado às rodas e o seu raio. A relação entre estas grandezas depende do rendimento da transmissão ($\eta_{transmissão}$) e da relação de redução da transmissão com engrenagens (G_{ratio}), como se expõe na equação (6-12).

$$F_{motora} = \frac{G_{ratio} \cdot \eta_{transmissão}}{r_{roda}} \cdot B_{motor} (N) \quad (6-12)$$

Para o veículo em estudo (ver Quadro 6-1), têm-se assim:

$$F_{motora} = \frac{5,3125 \times 0,86}{0,298} \cdot B_{motor} = 15,33 \cdot B_{motor} (N) \quad (6-13)$$

Igualando as equações (6-6) e (6-13) é possível definir o comportamento dinâmico do veículo em função do binário motor e da velocidade de deslocamento.

$$15,33 \cdot B_{motor} = 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta) (N) \quad (6-14)$$

A equação (6-14) pode ser convertida para três equações diferenciais de primeira ordem, substituindo o B_{motor} pelas expressões de binário obtidas para os intervalos de 1 a 3.

Intervalo 1:

$$15,33 \times (164,58 - 0,895520 \cdot v) = 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta)$$

$$m \cdot 1,05 \cdot \frac{dv}{dt} = 2523,01 - 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) - 13,73 \cdot v - 0,406572 \cdot v^2 - 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2402,87}{m} - 0,057867 \cdot \cos(\theta) - \frac{13,08}{m} \cdot v - \frac{0,387211}{m} \cdot v^2 - 9,33 \cdot \sin(\theta)$$

Intervalo 2:

$$15,33 \times (276,42 - 6,112050 \cdot v) = 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta)$$

$$m \cdot 1,05 \cdot \frac{dv}{dt} = 4237,52 - 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) - 93,70 \cdot v - 0,406572 \cdot v^2 - 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{4035,73}{m} - 0,057867 \cdot \cos(\theta) - \frac{89,24}{m} \cdot v - \frac{0,387211}{m} \cdot v^2 - 9,33 \cdot \sin(\theta)$$

Intervalo 3:

$$15,33 \times (152,51 - 2,596191 \cdot v) = 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) + 0,406572 \cdot v^2 + 1,05 \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta)$$

$$m \cdot 1,05 \cdot \frac{dv}{dt} = 2337,98 - 0,06076 \cdot m \cdot \cos(\theta) - 39,80 \cdot v - 0,406572 \cdot v^2 - 9,8 \cdot m \cdot \sin(\theta)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2226,65}{m} - 0,057867 \cdot \cos(\theta) - \frac{37,90}{m} \cdot v - \frac{0,387211}{m} \cdot v^2 - 9,33 \cdot \sin(\theta)$$

Estas equações descrevem a diferença de velocidade entre dois valores consecutivos, compreendidos num dado período, podendo representar-se por:

Intervalo 1:

$$v_{n+1} = v_n + \delta t \cdot \left(\frac{2402,87}{m} - 0,057867 \cdot \cos(\theta) - \frac{13,08}{m} \cdot v - \frac{0,387211}{m} \cdot v^2 - 9,33 \cdot \sin(\theta) \right)$$

$$0 < v \leq 21,44 \text{ m/s}$$

Intervalo 2:

$$v_{n+1} = v_n + \delta t \cdot \left(\frac{4035,73}{m} - 0,057867 \cdot \cos(\theta) - \frac{89,24}{m} \cdot v - \frac{0,387211}{m} \cdot v^2 - 9,33 \cdot \sin(\theta) \right)$$

$$21,44 < v \leq 35,25 \text{ m/s}$$

Intervalo 3:

$$v_{n+1} = v_n + \delta t \cdot \left(\frac{2226,65}{m} - 0,057867 \cdot \cos(\theta) - \frac{37,90}{m} \cdot v - \frac{0,387211}{m} \cdot v^2 - 9,33 \cdot \sin(\theta) \right)$$

$$35,25 < v \leq 46,99 \text{ m/s}$$

Estão assim obtidas as equações diferenciais que modelizam o comportamento dinâmico do veículo. Com base nestas foi desenvolvida uma aplicação em Matlab para simular a evolução da velocidade instantânea ao longo do tempo para diferentes cenários com a alteração da massa do veículo e da inclinação do pavimento.

Na simulação realizada o valor da velocidade do instante seguinte é obtido através da integração de um intervalo de tempo (δt), partindo da condição inicial de $v_n = 0$ para o instante de $t = 0$. A partir desta simulação é também possível conhecer o comportamento de outros parâmetros, tais como a aceleração instantânea, a distância percorrida, a potência fornecida pelo motor e as forças atuantes, como explicado no capítulo 3. Os resultados obtidos são expostos no capítulo 8.

6.7 Diagrama eléctrico geral

A Figura 6-17 apresenta o digrama de ligações dos componentes que integram o sistema propulsor eléctrico do veículo. É feita a seguir uma descrição sucinta do seu funcionamento.

- **Ativação – Alimentação aos circuitos auxiliares**

Quando a chave de ignição comuta da posição “Lock” para “Key on” é estabelecida a alimentação da bateria de 12 V aos circuitos de instrumentação através do fecho do contacto associado a K1. Neste momento são ligadas a bomba de vácuo e a bomba de circulação da refrigeração.

Os circuitos de instrumentação auxiliar mantidos do veículo original tais como piscas, luzes, escovas dos vidros e faróis, são também alimentados a partir deste circuito para que o utilizador disponha das mesmas funções de um veículo convencional. Para isso, é fechado também o contacto associado a K3, permitindo que a bateria auxiliar (de 12 V) possa ser recarregada a partir da bateria de tração.

- **Ordem de marcha – Alimentação do controlador/motor ligada**

O controlador/motor é ativado pelo botão de pressão “Start Ignição”. Quando este é acionado o contacto associado ao “Start Relé” é fechado e a entrada *KSI* (pino 1) do controlador é ligada ao terminal positivo da bateria de tração. A saída *KSI Coil Return* (pino 13) fica ativa e passa a ter uma tensão que alimenta a bobine do *Contactor Main*, que por sua vez está associada a um contacto, normalmente aberto (na), que estabelece a ligação entre o terminal positivo da bateria de tração e o terminal B+ do controlador. O contacto (na) associado a K2 retém a alimentação ao “Start Relé” mantendo o controlador/motor em serviço. A partir deste instante o veículo está pronto para circular.

O sistema de ventilação é acionado em simultâneo por forma a garantir o início da operação do controlador abaixo do limite máximo de temperatura. Quando este valor é atingido o “Termóstato Relé” comanda o fecho do respectivo contacto, permitindo o acionamento das ventoinhas para o arrefecimento forçado.

- **Ordem de paragem - Alimentação do controlador/motor desligada**

O botão “Stop Ignição”, normalmente fechado, tem como função interromper a alimentação ao controlador (desligar o sistema propulsor). Quando pressionado, a bobine de K2 deixa de ser alimentada e o respectivo contacto é aberto, interrompendo a alimentação do “Start Relé”. Os circuitos de instrumentação que são alimentados diretamente a partir do contacto de K1 continuam em serviço, enquanto a chave de ignição permanecer na posição “Key on”.

- **Desativação – Alimentação aos circuitos auxiliares é interrompida**

Quando a chave de ignição regressa à posição “Lock” é interrompida a alimentação a todos os circuitos auxiliares e o veículo fica desligado.

6 - Projeto do sistema propulsor eléctrico do veículo escolhido

O veículo dispõe ainda de um botão de “Paragem de Emergência” para a sua imediata imobilização sempre que o utilizador assim o pretender perante uma eventual falha ou situação de risco. Quando este é pressionado o contacto associado a K1 é aberto, interrompendo a alimentação da bateria aos circuitos de instrumentação e consequentemente a marcha do motor. Este botão é do tipo normalmente fechado como indicado na Figura 6-17.

6 - Projeto do sistema propulsor eléctrico do veículo escolhido

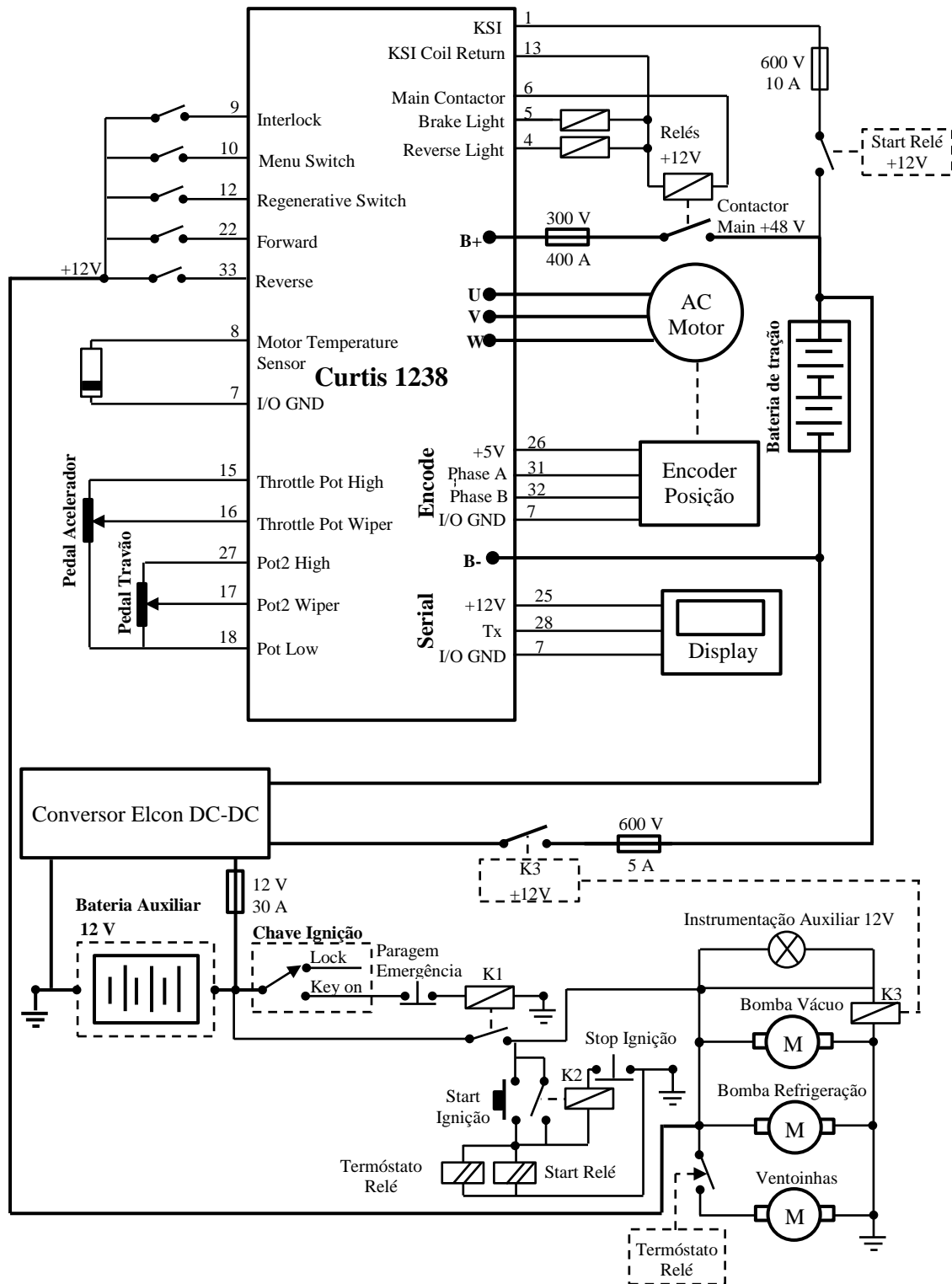


Figura 6-17: Diagrama geral do *Power Drive* eléctrico.

No Anexo 1 apresenta-se o respectivo esquema de montagem.

7. Projeto da bateria com BMS

Tendo por base a tensão e a corrente requeridas para a alimentação *power drive* é exposto neste capítulo o projeto da bateria com BMS para uso no veículo eléctrico. É efetuado também em esboço de sua apresentação, bem como a seleção dos componentes necessários para a sua concretização e escolhido um carregador e a supervisão dos parâmetros críticos da bateria.

7.1 Escolha do tipo de células para o projeto da bateria

Como foi referido no capítulo 4, a escolha do tipo de células para a bateria recairá no formato 18650.

Das ofertas disponíveis no mercado, o modelo NCR18650B da *Panasonic* (Figura 7-1) apresenta a melhor relação preço/qualidade, constituindo a escolha para o projeto da bateria do veículo eléctrico. Estas células possuem uma densidade de energia de 243 Wh/kg, são seguras, robustas e suportam um elevado número de ciclos de carga e de descarga.



Figura 7-1: Célula *Panasonic* NCR18650B [66].

No Quadro 7-1 expõem-se as principais características das células NCR18650B, necessárias ao projeto, estando a totalidade das mesmas no Anexo 2.

Quadro 7-1: Especificações técnicas da célula *Panasonic* NCR18650B.

Características	Descrição
Capacidade nominal	3350 mAh
Tensão nominal	3,6 V
Tensão <i>cut-off</i> de carga (0,5 C)	4,2 V
Tensão <i>cut-off</i> de descarga (1C)	2,5 V
Densidade de energia	243 Wh/kg
Corrente nominal	3350 mA
Máxima corrente de descarga contínua	2C (6,7A)
Máxima corrente de descarga de pico (5 a 6 s)	12 A
Ciclo de vida ¹	Com DoD até70 %, superior a 2000 ciclos
Peso	48,5 g
Diâmetro	18,5 mm
Altura	65,3 mm
Temperatura de operação	na carga: 0 a 45° C na descarga: -20 a 60° C

Fonte: “*Panasonic NCR18650B*”, Especificações técnicas do fabricante *Panasonic*;

¹ “*Tesla Motors Club*”, (<http://www.teslamotorsclub.com/showthread.php/15579-Tesla-Motors-CTO-talks-future-batteries-and-charging-protocols/page4>).

7.2 Agrupamento de células

Para o projeto da bateria é necessário ter presente as especificações técnicas dos componentes que integram o *Power Drive* eléctrico expostas na Figura 7-2.

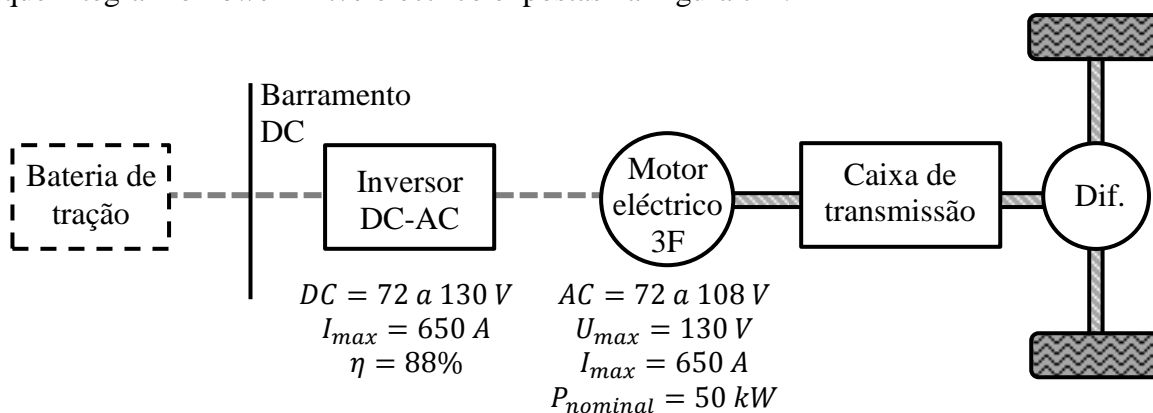


Figura 7-2: Especificações do *Power Drive* eléctrico utilizadas no projeto da bateria.

Com base nas especificações de entrada do inversor é calculado o número de células a agrupar em série e paralelo para alcançar a tensão e corrente desejadas no barramento DC que o alimenta.

Dividindo a máxima tensão suportada pelo inversor pela tensão nominal de uma célula (ver Quadro 7-1), obtém-se o número de células que devem ser agrupadas em série:

$$\text{Número de células em série} = \frac{U_{max_inversor}}{U_{célula}} = \frac{130\text{ V}}{3,6\text{ V}} = 36,11\text{ células}$$

Estabeleceu-se que serão agrupadas 36 células em série para proporcionar a tensão de 129,6 V.

Com base neste valor de tensão pode-se conhecer a corrente absorvida pelo inversor à potência nominal, a partir da qual pode ser determinado o número de células a agrupar em paralelo. Considerando o rendimento do inversor $\eta_{inversor}$ e a potência do motor P_{motor} tem-se assim a potência que a bateria deverá fornecer para a alimentação do conjunto motor + controlador:

$$P_{absorvida} = \frac{P_{motor}}{\eta_{inversor}} = \frac{50\text{ kW}}{0,88} = 56,82\text{ kW}$$

Para a tensão estipulada de 129,6 V têm-se:

$$I_{bateria} = \frac{P_{bateria}}{U_{DC}} = \frac{56.820\text{ W}}{129,6} = 438,43\text{ A}$$

Com o intuito de estender a sua vida útil, arbitrou-se que as células serão submetidas à descarga máxima de 2C.

- Repare-se que seria necessário um maior número de células em paralelo para alcançar o valor de corrente desejado se estas descarregarem a uma taxa inferior.

$$\text{Capacidade (Ah)} = \frac{\text{Número de células em paralelo} \times I_{célula}(A)}{\text{Descarga (C)}}$$

- Logo, armazenam uma maior quantidade de energia, dada por:

$$E = U_{bateria} \times \text{Capacidade (Wh)}$$

A corrente debitada por cada célula a esta descarga, é:

$$I_{célula} = \text{Descarga} \times \text{Capacidade (1C)} = 2 \times 3350\text{mAh} = 6700\text{ mA}$$

Com base neste valor obtém-se o número de células a agrupar em paralelo:

$$\text{Número de células em paralelo} = \frac{I_{\text{bateria}}}{I_{\text{célula}}} = \frac{438,43 \text{ A}}{6,7 \text{ A}} = 65,43 \text{ células}$$

Concluiu-se então que serão necessárias 66 células em paralelo para fornecer a corrente de 438,43 A, sem ultrapassar a descarga de 2C.

A Figura 7-3 ilustra o esquema de ligações das células para a bateria projetada do veículo eléctrico, composta por 36 packs dispostos em série, com cada pack constituída por 66 células em paralelo.

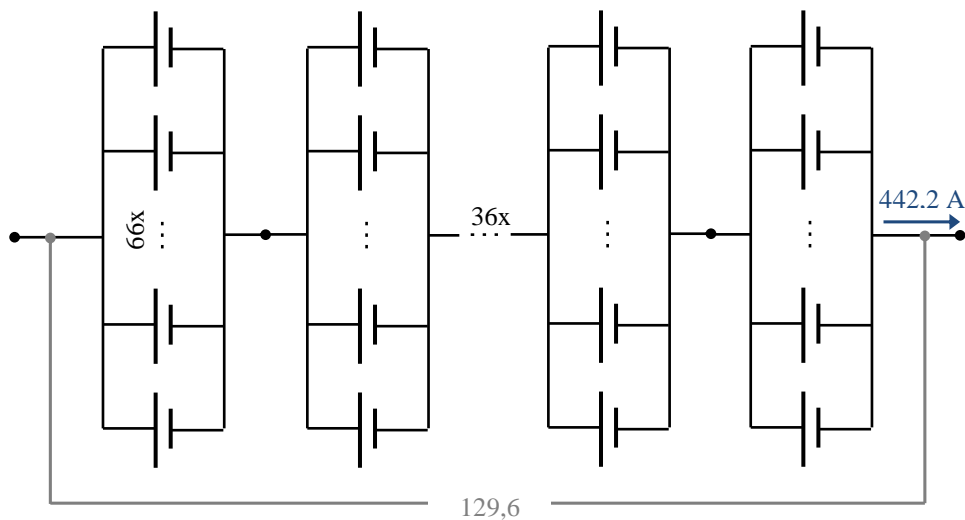


Figura 7-3: Esquema de ligações das células da bateria.

7.3 Escolha do carregador

Para a recarga da bateria é necessário um carregador que proporcione uma tensão ligeiramente superior a 129,6 V no barramento DC. O carregador escolhido é apresentado na Figura 7-4.



Figura 7-4: Carregador AC-DC Elcon PFC2500 [67].

No Quadro 7-2 expõem-se as principais características deste carregador.

Quadro 7-2: Especificações técnicas do carregador AC-DC *Elcon* PFC2500.

Características	Descrição
Corrente de entrada	0,2 a 15 A AC
Corrente de saída	4 a 40 A DC
Tensão de entrada	90 a 260 V
Tensão de saída	36 a 408 V
Frequência	45 a 65 Hz
Eficiência	92 %
Factor de potência	0,98
Peso	7 kg
Dimensões	352 mm x 195 mm x 139 mm
Temperatura de operação	80°C: reduz a corrente de saída 85 °C: <i>chutdown</i>

Fonte: “PFC2500”, Manual de especificações técnicas do fabricante *Elcon*.

Dos valores expostos no Quadro 7-2, constata-se que o carregador possui uma eficiência elevada e um factor de potência próximo de valor unitário. Isto significa que as formas de onda sinusoidais são preservadas na entrada como consequência da reduzida taxa de distorção harmónica (THD). Com a penetração dos veículos eléctricos estes parâmetros serão cada vez mais importantes para mitigar as perturbações no fornecimento de energia.

O carregador selecionado dispõe ainda de proteção que interrompe a carga na presença de um curto-circuito ou quando a tensão de entrada sai dos seus limites (mínimo e máximo) da gama de operação.

7.4 Especificações técnicas da bateria

A bateria a concretizar é baseada num modelo em matriz, ilustrado na Figura 7-5. As células são instaladas verticalmente, lado a lado, dispostas em *packs* de 66 unidades ligadas em paralelo, com 36 *packs* ligados em série, alternando com o terminal positivo (topo a preto) ou negativo (base a verde).

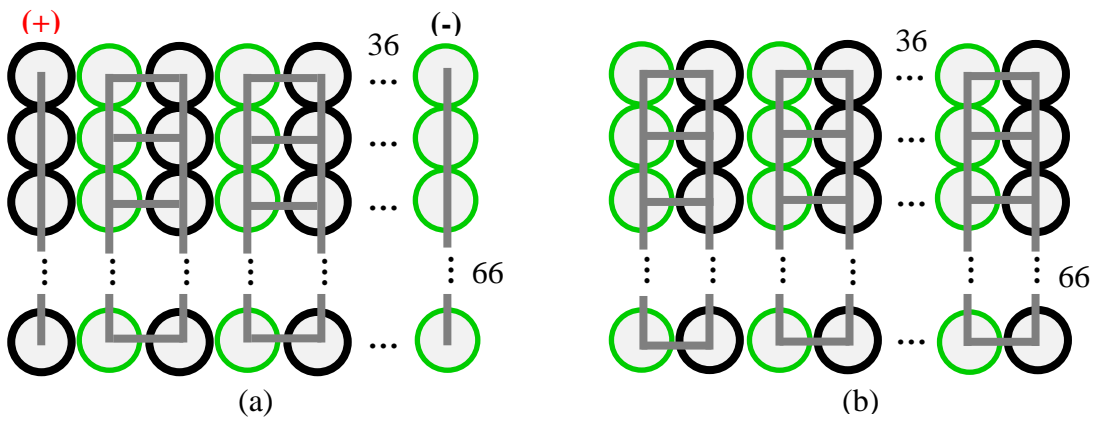


Figura 7-5: Matriz de agrupamento de células (a) vista de topo e (b) vista de baixo.

A Figura 7-6 exibe uma vista lateral da bateria com destaque para a ligação em série das células (são omitidas as células em paralelo).

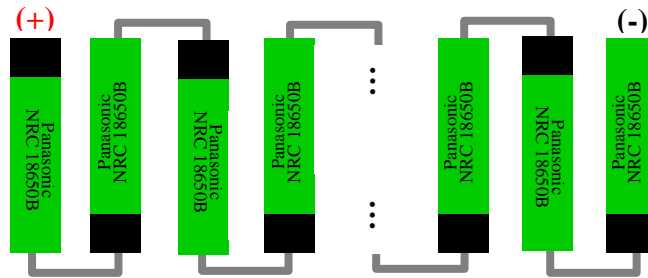


Figura 7-6: Vista lateral do agrupamento de células.

O número total de células foi subdividido em 18 *packs*, cada um com 12 células ligadas em série, proporcionando uma tensão de 43,2 V ($12 \times 3,6 V$) e 11 células em paralelo que debitam uma corrente de 73,7 A ($11 \times 6,7 A$), como mostra a Figura 7-7.

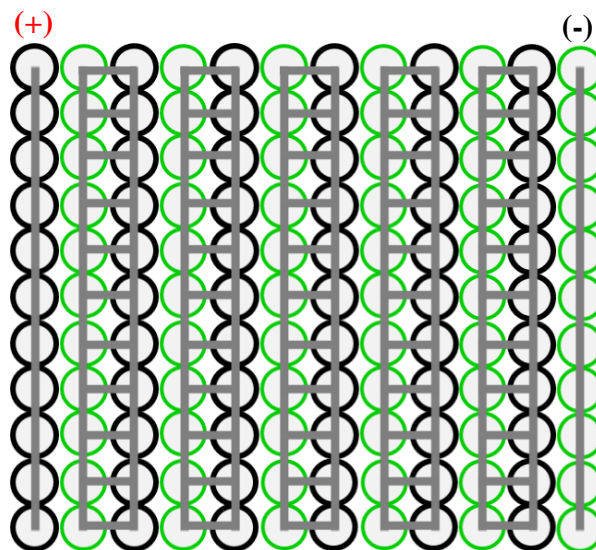


Figura 7-7: Agrupamento de células num *pack* visto de topo.

As células serão alojadas numa matriz de suportes adequados ao tipo de célula em causa, que fixam a base e o topo de cada, conferindo uma estrutura compacta e firme (Figura 7-8). Estes suportes proporcionam uma montagem fácil, agrupando-se por encaixe, além de constituem uma solução de baixo custo.



Figura 7-8: Exemplo de montagem das células em matriz de suportes [68].

A Figura 7-9 ilustra uma possível representação de um *pack*, com 12 células ligadas em série e 11 em paralelo. Para a ligação eléctrica das células serão utilizadas barras de cobre de secção adequada, soldadas nos seus terminais, permitindo uma ligação flexível e robusta.

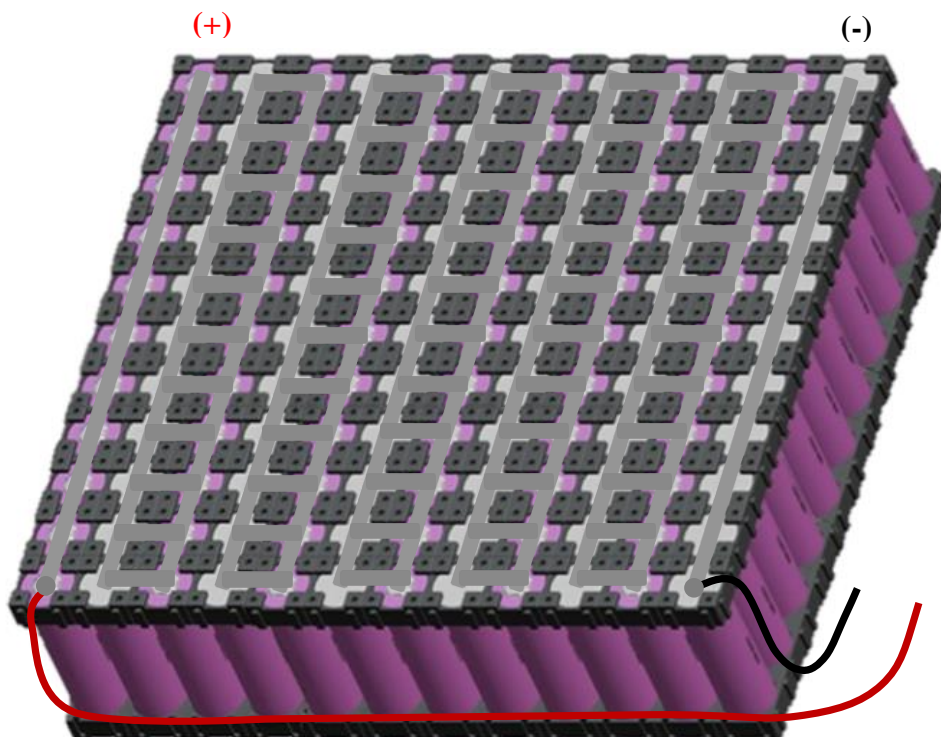


Figura 7-9: Desenho tridimensional de um *pack*.

No Quadro 7-3 expõem-se as características de cada um dos *packs*.

Quadro 7-3: Característica de um *pack*.

Características	Descrição
Tensão nominal	43,2 V
Corrente debitada (2C)	73,7 A
Potência nominal	$43,2 V \times 73,7 A = 3,2 kW$
Capacidade à descarga de 2C	$73,7 A/2C = 36,85 Ah$
Energia armazenada	$43,2 V \times 36,85 Ah = 1,6 kWh$
Peso (células + suportes)	$(132 \times 0,0485 kg) + (264 \times 0,02 kg) = 11,68 kg$
Dimensões (com matriz de suportes)	0,24 m x 0,22 m x 0,068 m
Volume	3,6 litros

A bateria será assim constituída por 3 *string* colocadas em série, cada com 6 *packs* ligados em paralelo por forma a alcançar a tensão ($3 \times 43,2 V = 129,6 V$) e a corrente ($6 \times 73,7 A = 442,2 A$) necessária para a alimentação do inversor, como mostra a Figura 7-10.

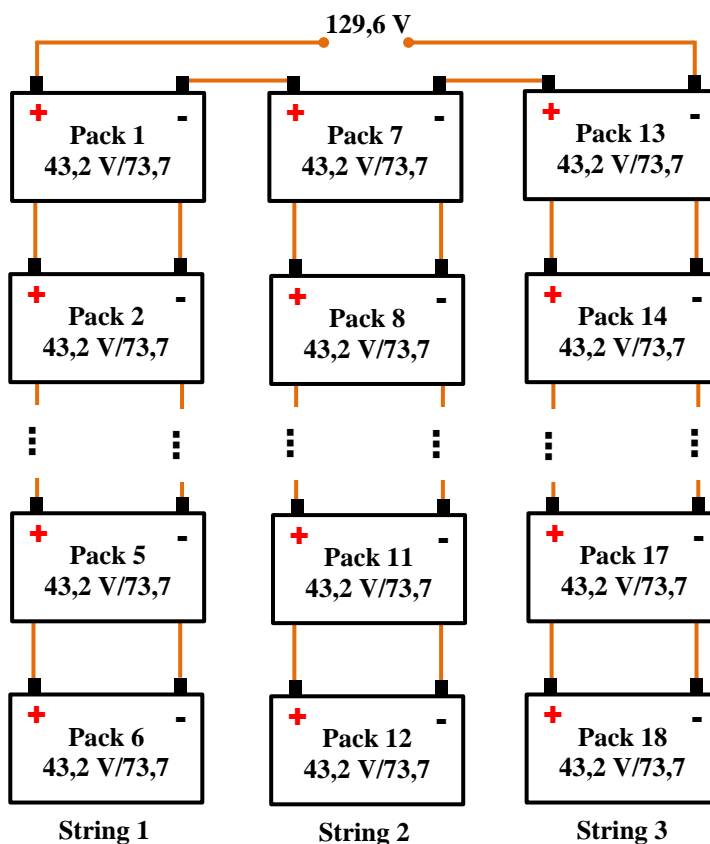


Figura 7-10: Agrupamento dos *packs* da bateria.

A Figura 7-11 e Figura 7-12 ilustram uma possível representação do encapsulamento para o alojamento da bateria, bem como a disposição dos *packs* que a compõem.

A caixa deve ser fabricada em PVC com espaçamentos de 5 milímetros entre os *packs* para que possam ser refrigerados por circulação natural ou forçada de ar. Os *packs* localizados no topo serão fixados em calhas de alumínio que se dispõem paralelamente à largura de cada *string*, aparafusadas nas suas extremidades às paredes da caixa. Na base os *packs* serão também suspensos em calhas com uma distribuição igual à do topo, resultando numa uniformização das condições de manutenção da temperatura. Esta caixa terá entradas de ar laterais e uma saída de ar superior que poderá ser forçada por um ventilador instalado no topo, controlado pelo BMS, para extração do ar quente quando a temperatura excede o limite máximo. As entradas de ar devem possuir filtros para evitar a entrada de resíduos que possam comprometer o seu funcionamento. Para a manutenção, dispõe de um tampo facilmente removível.

A concretização do encapsulamento da bateria deverá ser realizada por uma empresa especializada por forma a garantir a sua qualidade.

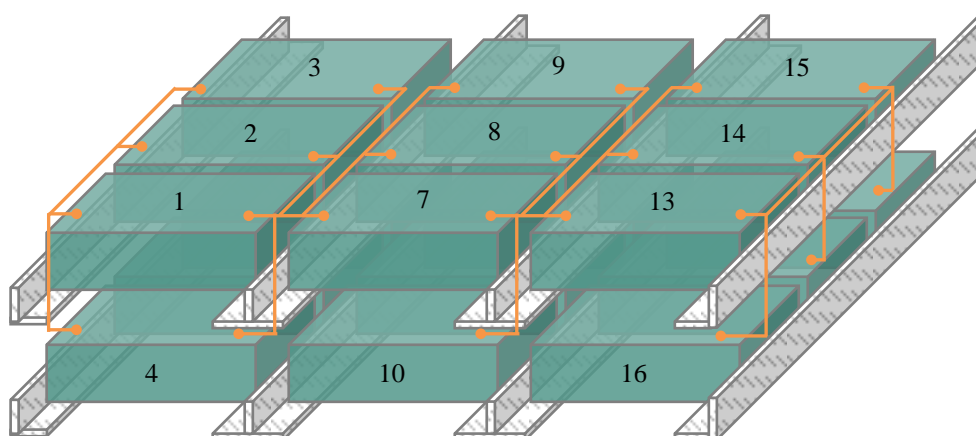


Figura 7-11: Possível agrupamento dos *packs* no volume da bateria.

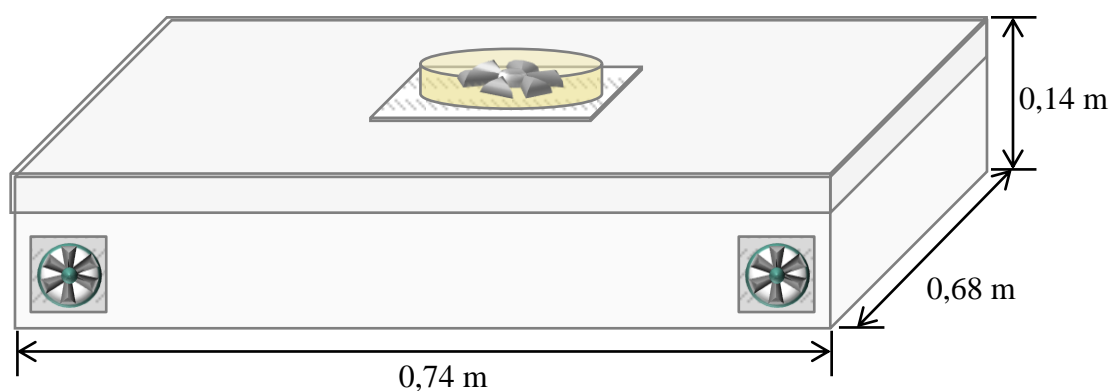


Figura 7-12: Possível aspecto exterior da bateria com encapsulamento e sistema de ventilação.

No Quadro 7-4 expõem-se as características da bateria projetada para o veículo eléctrico.

Quadro 7-4: Características da bateria projetada.

Características	Descrição
Tensão nominal	$36 \times 3,6 = 129,6 V$
Corrente debitada com descarga 2C	$66 \times 6,7 = 442,2 A$
Potência nominal	57,3 kW
Capacidade à descarga de 2C	$442,2/2C = 221,1 Ah$
Energia armazenada	$129,6 \times 221,2 = 28,7 kWh$
Peso (encapsulamento + BMS)	211 kg
Densidade de energia (células +encapsulamento)	136 Wh/kg
Dimensões (com espaços de 5 mm entre packs)	0,74 m x 0,68 m x 0,15 m
Volume do encapsulamento	75,5 litros

7.5 Escolha do BMS

Como foi referido no capítulo 5 a escolha do BMS depende do número de células utilizadas na bateria bem como do controlador e do carregador seleccionados. O BMS escolhido é um Lithiumate Pro Master (Figura 7-13) da *Elithion* com capacidade para uma bateria com até 256 células em série, limitado à tensão de 900 V, não existindo restrições quanto ao número de células a monitorizar em paralelo.



Figura 7-13: *Lithiumate Pro BMS Master* - Ref.^a 2CN0000E da *Elithion* [69].

Este BMS suporta a topologia distribuída (secção 5.2.4) permitindo a precisão e a fiabilidade desejadas para o sistema com *cell boards* que medem a tensão e a temperatura em cada *pack* da série que compõem a bateria. A corrente na bateria é medida por um sensor de efeito de Hall. O balanceamento da carga é implementado ao nível das *cell boards* pelo método passivo (secção 5.1.4).

A escolha deste BMS deve-se também às funcionalidades que suporta. Possui interfaces de comunicação série RS232 e *CANbus* para o envio de informações a dispositivos periféricos (como por exemplo *display's* ou computador) que permitem ao utilizador aceder às configurações dos parâmetros da bateria e ao histórico. Estes fornecem também indicação do estado da bateria com base no cálculo dos SoC, DoD e SoH, bem como tensão e corrente instantâneas.

Para o controlo dos parâmetros críticos da bateria o BMS pode utilizar a mesma plataforma *CANbus* para comunicar os parâmetros CCL e DCL ao carregador e inversor, respectivamente ou recorrer a interligações com cablagem. Neste projeto optou-se pela segunda alternativa, uma ligação mais intuitiva e menos dispendiosa. O BMS dispõe também de uma saída de 12 V DC com controlo *on-off* para a ligação de um sistema de ventilação quando a temperatura das células assim o requiere [70].

Como interface visual o BMS possui múltiplos *Leds* que indicam o estado do seu funcionamento e da bateria (ver Figura 7-13). No Quadro 7-5 expõem-se as funcionalidades dos *Leds* mais relevantes.

Quadro 7-5: Funções dos leds [71].

Cor	Led	Função
Vermelho	V_{+LOAD}	<i>On</i> : bateria debita corrente para o controlador ou recarrega por regeneração.
Laranja	$V_{+SOURCE}$	<i>On</i> : a bateria é recarregada pelo carregador
Vermelho: descarga Verde: carga	I_{batt}	<i>On</i> : descarga (vermelho) e recarga (verde)
Azul	LLIM	<i>On</i> : descarga da bateria é inibida (bateria vazia ou temperatura fora da SOA).
Laranja	HLIM	<i>On</i> : recarga da bateria interrompida (bateria cheia ou temperatura fora da SOA)
Azul	Fan	<i>On</i> : de saída de 12 V DC (accionamento da ventoinha).

7.5.1 Medição da tensão e da temperatura

A medição da tensão e da temperatura é implementada através de uma *cell board* instalada aos terminais de cada grupo de 66 células ligadas em paralelo (Figura 7-14). Estas agrupam-se em bancos de até 16 *cell boards* que ligam a cada uma das 16 entradas “Bank” da unidade BMS. Para a ligação ao BMS, estes devem possuir uma *cell board* de terminal positivo (*positive end* ou CB+) que liga à célula com tensão mais elevada do banco e uma *cell board* de terminal negativo (*negative end* ou CB-) para a ligação à célula com menor tensão. Nas células restantes utilizam-se *cells boards* do tipo *mid bank* ou CBM [72] [73].

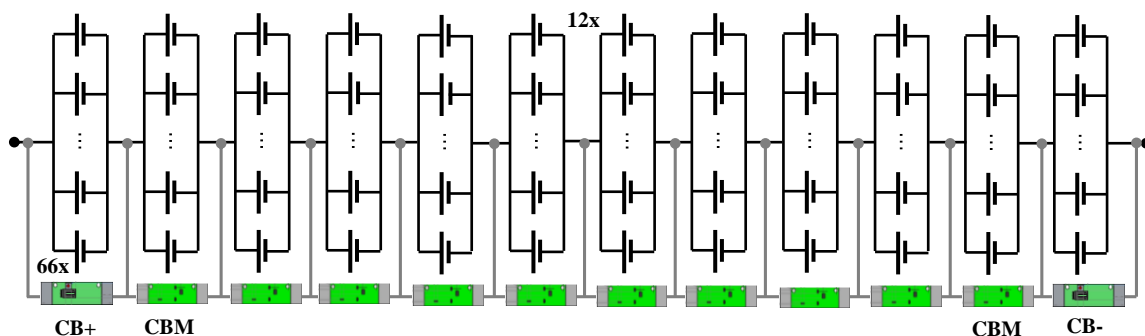


Figura 7-14: Ligação das *cell boards* em cada *pack* da bateria.

Para a bateria projetada são assim necessárias 36 *cell boards*, tendo sido divididas por 3 bancos, com cada banco a monitorizar 12 *packs* de células ligadas em paralelo, conforme ilustrado na Figura 7-15. Posto isto, serão utilizadas 30 *cell boards* do tipo *mid bank*, 3 do tipo *positive end* e 3 do tipo *negative end* que ligam ao terminal positivo e negativo de cada banco, respectivamente.

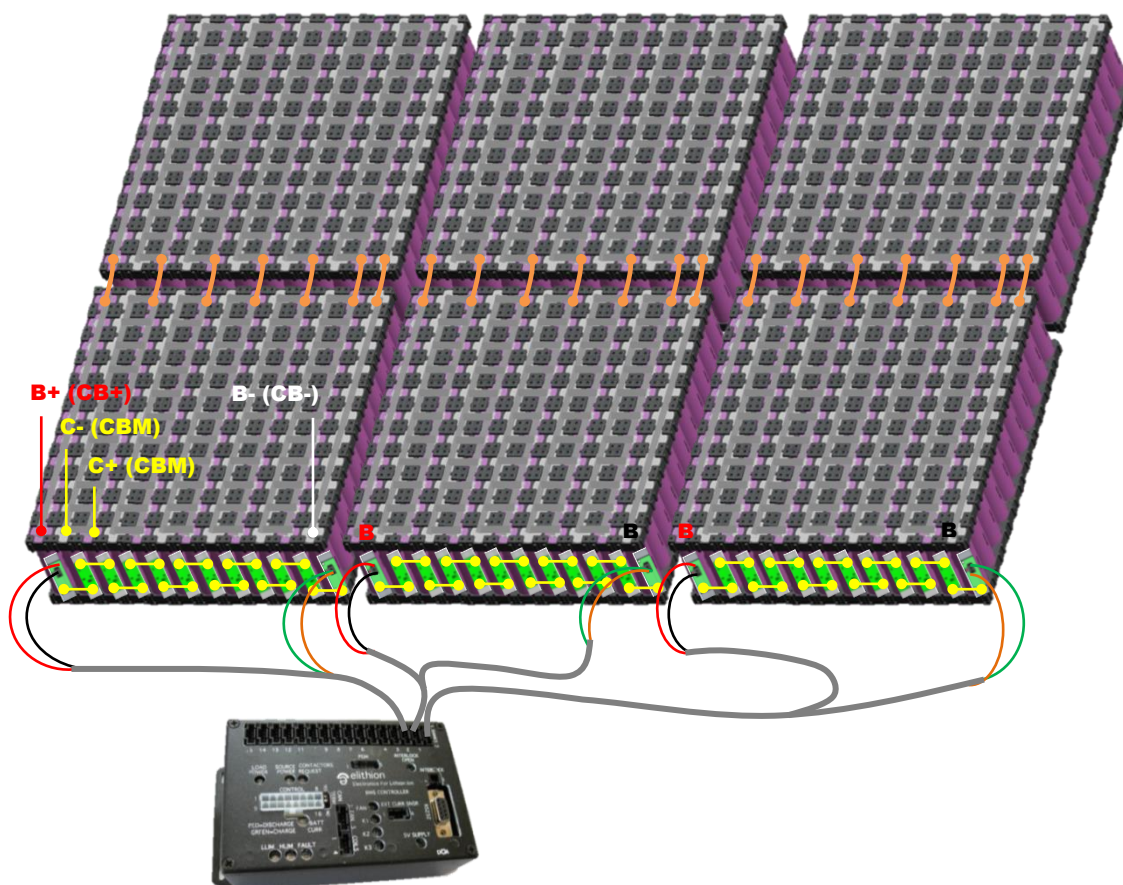


Figura 7-15: Ligação das *cell boards* ao BMS.

Para que a mesma *cell board* possa monitorizar 66 células em paralelo é necessário que cada grupo de 11 células de um *pack* se ligue na mesma linha ao grupo do *pack* seguinte ao longo da *string*. As *cell boards* devem ser montadas consoante a polaridade da célula a que serão

soldadas, alternando a sua disposição com estas, para que o terminal C- ligue na face negativo da linha de células e o terminal C+ à linha positiva das células. Estas, por sua vez, ligam-se ao terminal oposto, C+ ou C-, da *cell board* seguinte, como mostra a Figura 7-15.

As diferentes *cell boards* apresentam-se na Figura 7-16.

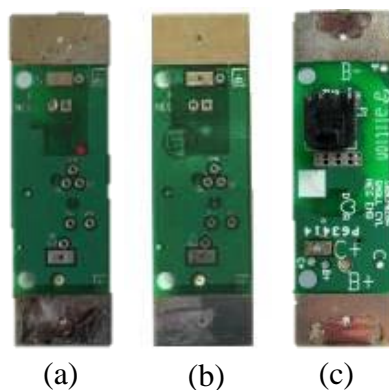


Figura 7-16: *Cell boards* do tipo (a) *positive end*, (b) *mid bank* e (c) *negative end* [74].

7.5.2 Medição da corrente

A medição da corrente debitada pela bateria é realizada por dois sensores de efeito de *Hall* (Figura 7-17), um de 50 A instalado entre o carregador e a bateria e um outro de 600 A na alimentação da bateria ao controlador, como exposto na Figura 7-18. Repare-se que a corrente de carga é muito menor que a corrente de descarga.



Figura 7-17: Sensor de efeito de *Hall* Tamura – Ref.^a 2CS0XX0K [75].

Na escolha dos sensores de corrente foi também tida em consideração a medição da corrente de recarga que ocorre por travagem regenerativa, para que fique totalmente assegurada a proteção da bateria. Posto isto, o sensor de 600 A deverá medir a corrente nos dois sentidos (bidirecional) e o sensor de 50 A mede apenas num sentido (unidirecional).

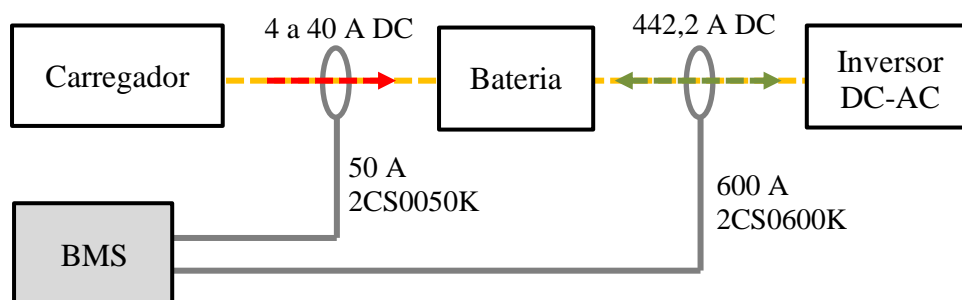


Figura 7-18: Instalação dos sensores de corrente.

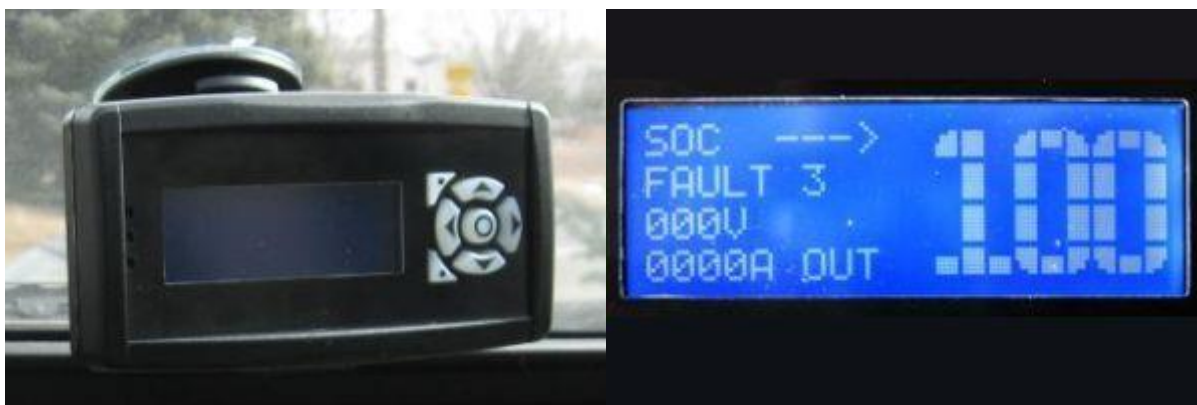
No Quadro 7-6 expõem-se as características dos sensores de corrente seleccionados, bem como os códigos de cores dos condutores associados aos terminais que ligam ao BMS.

Quadro 7-6: Especificações técnicas dos sensores de efeito de *Hall* – Ref.^a 2CS0XX0K [76].

Características	2CS0050K	2CS0600K
Corrente nominal	50 A	600 A
Corrente máxima	62 A	750 A
Precisão	+/- 0,5 A	+/- 6 A
Tensão de alimentação	+/- 15 V +/- 5%	
Sinal de tensão de saída (<i>Vout</i>)	+/- 4 V +/- 40 mV	
<i>Pinout</i> : 1	Condutor Vermelho: + 15 V	
2	Condutor Verde: -15 V	
3	Condutor Branco: <i>Vout</i>	
4	Condutor Preto: <i>Ground</i>	

7.5.3 Mostrador e gestor de parâmetros do veículo

O fabricante do BMS seleccionado recomenda a instalação a bordo do veículo de um *display* de multifunções que se apresenta na Figura 7-19. Este fornece indicações da corrente, tensão e estado de carga da bateria (SoC). Dispõe ainda de alarmes para o caso de ocorrer uma eventual falha na bateria ou no BMS. A ocorrência destes parâmetros e alarmes são gravados num cartão *MiniSD* podendo ser visualizadas a partir de computador.

Figura 7-19: *Display* 6DS0020P [77].

Este *display* comunica com o BMS através de *interface CANbus* cujas ligações se expõem no Quadro 7-7.

Quadro 7-7: Especificações técnicas do *display* 6DS0020P [77].

Características	Descrição
Tensão	12 V
Tipo de conexão	RJ45
Velocidade do <i>CANbus</i>	125, 250 ou 500 kHz
<i>Pinout</i> : 1	CANH
2	CANL
3	<i>Ground</i>
8	<i>Supply</i>
Dimensões	16,5 x 8,26 x 2,54 cm

7.6 Diagrama geral de ligações do BMS

A Figura 1-20 apresenta o digrama geral de ligações do BMS ao *Power Drive* eléctrico do veículo e à instrumentação de supervisão dos parâmetros da bateria.

- **Ligação da instrumentação de supervisão dos parâmetros críticos da bateria**

Os sensores de corrente são ligados aos pinos “EXT CURR SNS” (pino 3) do BMS, conforme mostra a Figura 1-20, com exceção do sinal de saída “Vout” do sensor de 50 A, que liga na entrada analógica “SRCCUR” (pino 6). O sensor de corrente de 50 A deve ser instalado à saída do carregador e o de 600 à entrada do inversor.

A ligação da bateria de tração ao BMS é dividida nos seus 3 bancos, cada um com 12 *cell boards* que monitorizam a tensão e temperatura das 36 células em série, devendo esta ser realizada de forma sequencial do “Banco 1” para o “Banco 3”.

A comunicação do *display* de multifunções com o BMS é estabelecida dos canais “CANL” (pino 8) e “CANH” (pino 16) (vista explodida do *pinout* “CONTROL” no canto inferior direito) e é alimentado através da saída “V+” (pino 2) e “GND” (pino 1).

- **Acionamento do sistema de ventilação**

A ventoinha é acionada a partir da saída “FAN” (pino 3) do BMS, que aplica uma tensão de 12 V DC quando temperatura da bateria ultrapassa o limiar pré-definido.

- **Descarga da bateria - Acionamento do controlador/Motor ligado**

O acionamento do controlador depende de um contacto associado a K4 que por sua vez é comandado por um sinal em tensão que é colocado na saída “LLIM” (pino 10) do BMS. Quando a bateria atinge o seu estado de carga mínimo ou os limites da SOA são excedidos, o sinal LLIM comuta para o estado *low* e o contacto K4 é aberto, interrompendo a alimentação da bateria ao controlador. Como foi referido em 7.7 o controlador é ativado pela entrada KSI, que por sua vez estabelece a ligação da bateria ao controlador através do fecho do contacto “CONTACTOR MAIN”. A partir deste instante o veículo é imobilizado, independentemente do contacto “Start Relé”.

As correntes fornecidas pelo controlador ou regenerada durante a travagem estão, também, condicionadas ao sinal de saída “DCL” (pino 14) e “CCL” (pino 15) do BMS, respectivamente, que emitem um pedido de redução de corrente por forma a impedir que a bateria opere fora da SOA.

- **Recarga da bateria – Acionamento do carregador**

O carregamento da bateria é comandado por um contacto associado a K5 que é aberto quando a saída “HLIM” (pino 11) do BMS fica *on*, interrompendo a alimentação do carregador, aos seus terminais, à bateria. Como vimos em 5.1.2, este sinal inibe a carga enquanto não estiverem garantidas as condições de funcionamento dentro da SOA ou estiver à sua capacidade máxima. Se estas condições forem alcançadas o contacto de K5 é fechado e a bateria é recarregada.

Independente do estado da bateria, assim que a tomada for ligada à rede é ativada a entrada “V+Source” (pino 4) no BMS, por intermédio de um contacto associado a uma bobine K6 de 230 V que é alimentada a partir do carregador, e o veículo não podem mover-se.

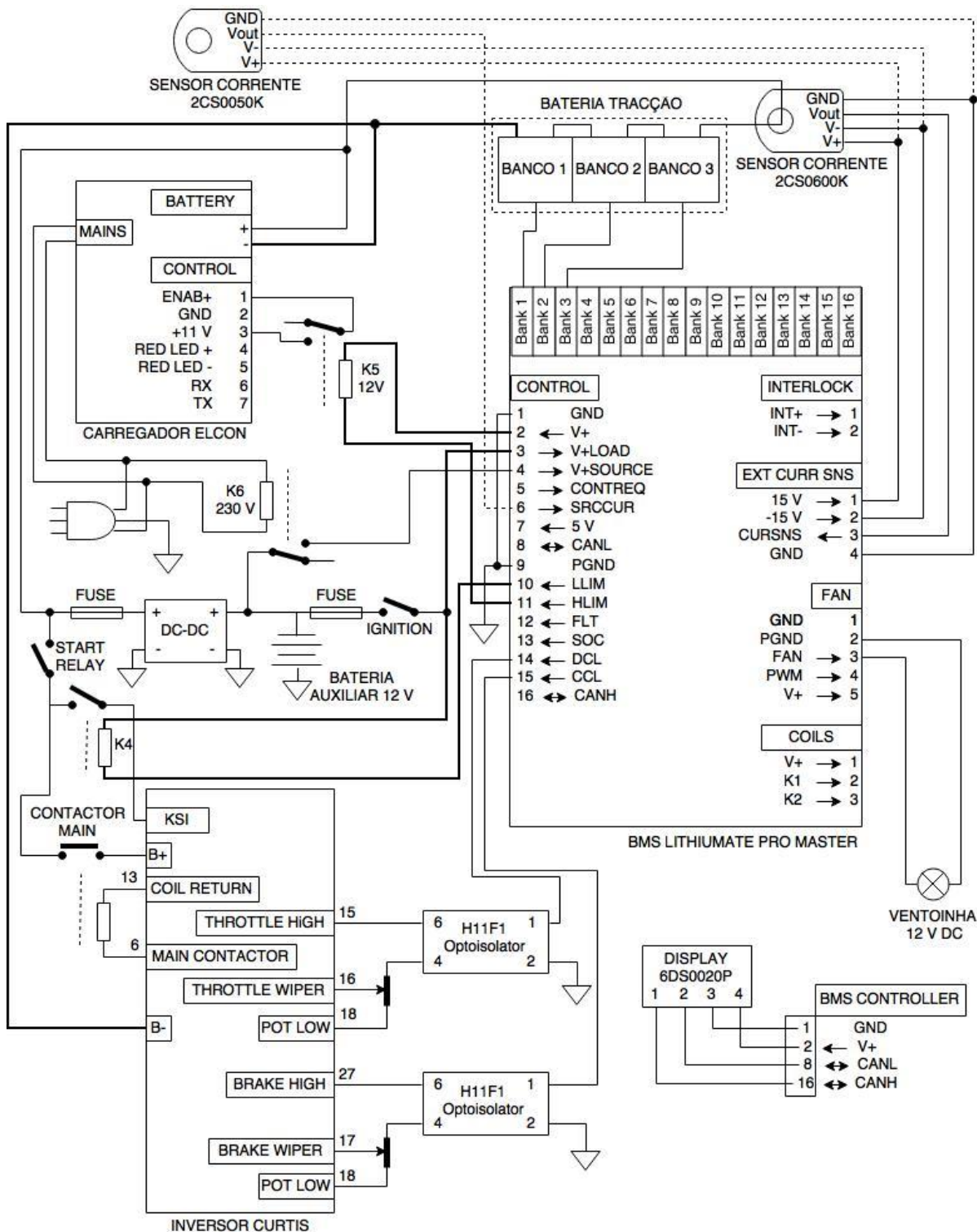


Figura 7-20: Digrama de ligações ao BMS.

8. Simulação das condições dinâmicas do veículo

Com o intuito de certificar as emissões de CO₂ no sector dos transportes foi concebida uma metodologia que permitisse calcular esse valor com rigor para qualquer veículo a comercializar. Foram assim definidos procedimentos para simular as condições de circulação que correspondessem a um padrão de mobilidade o mais próximas possível da realidade e em diferentes situações. Os testes ou ciclos de condução criados, especificam a velocidade em função do tempo com períodos de aceleração, desaceleração, velocidade constante e imobilização ao longo de aproximadamente 20 minutos. São utilizados atualmente os ciclos de condução europeus *European Driving Cycles* (EDC), americanos *United States Driving Cycles* (USDC) e japoneses *Japanese Driving Cycles* (JDC).

Na Europa esta certificação é realizada desde o ano 1990 com a aplicação do ciclo NEDC (*New European Driving Cycle*), concebido para representar as condições de condução numa cidade europeia típica, como se expõe na Figura 8-15. Este ciclo é constituído por um subciclo urbano denominado ECE-15 e um subciclo extraurbano denominado EUDC com condução mais agressiva. Com a duração de 1.180 segundos, o ciclo NEDC é repartido pela repetição de quatro vezes o subciclo ECE-15 com 195 segundos cada, seguido do subciclo EUDC com 400 segundos. O ensaio é realizado em banco de testes com controlo de algumas condições externas como por exemplo, com e sem vento e simulação da variação do declive, e recolhidos os parâmetros relevantes através de instrumentação dedicada [78] [79].

Embora exibam emissões inferiores, os veículos elétricos e híbridos plug-in são também submetidos a esta certificação pois que, independentemente do *mix* de geração do sistema electroprodutor que os alimenta, essa eletricidade tem sempre associadas emissões de CO₂ por kWh produzido.

Neste capítulo procede-se ao estudo do comportamento cinemático do veículo em projeto, com base na formulação matemática exposta no capítulo 6 e na alteração de algumas condições dinâmicas. É também realizada a simulação da performance energética com base no ciclo de condução NEDC, a fim de estimar o consumo energético e o impacto ambiental da sua utilização.

8.1 Simulação do comportamento dinâmico do veículo

Com base nas equações diferenciais expostas em 6.1 foi desenvolvida uma aplicação em Matlab (ver Anexo 3) para simular o comportamento dinâmico do veículo em diferentes cenários. Os resultados obtidos permitem conhecer a aceleração instantânea, a velocidade instantânea e máxima alcançável, e a distância percorrida em função da inclinação do pavimento e da massa do veículo, como a seguir se expõe.

8.1.1 Caso estudo 1 – Deslocamento no plano horizontal

Nesta secção é abordado o efeito das forças de atrito sobre o comportamento dinâmico do veículo no plano horizontal, bem como a relação do binário do motor com a velocidade de rotação, a potência e a força de propulsão desenvolvida.

Na simulação foi considerada a massa de 1.197 kg, que corresponde à tara do veículo mais o peso de um condutor de 70 kg. Os restantes parâmetros utilizados são os que constam no Quadro 6-1.

A Figura 8-1 ilustra a evolução da aceleração e velocidade do veículo em função do tempo.

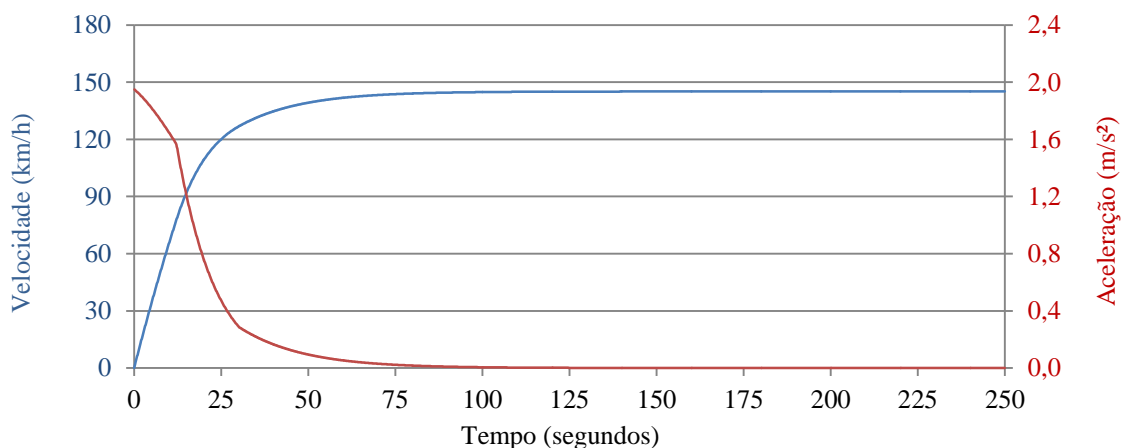


Figura 8-1: Aceleração instantânea e máxima velocidade alcançável.

Como se pode observar, a partir de um determinado instante o veículo alcança a máxima velocidade e a partir daí desloca-se a velocidade constante (145,14 km/h). De acordo com o exposto em 3.1, para esta velocidade a força que o motor transmite às rodas é igual à soma

8 - Simulação das condições dinâmicas do veículo

das forças de atrito no veículo e como consequência a força resultante e a aceleração são nulas.

Na Figura 8-2 exibem-se o binário e a potência do motor, em função da velocidade de rotação, conhecida a partir da expressão exposta em 6.4.

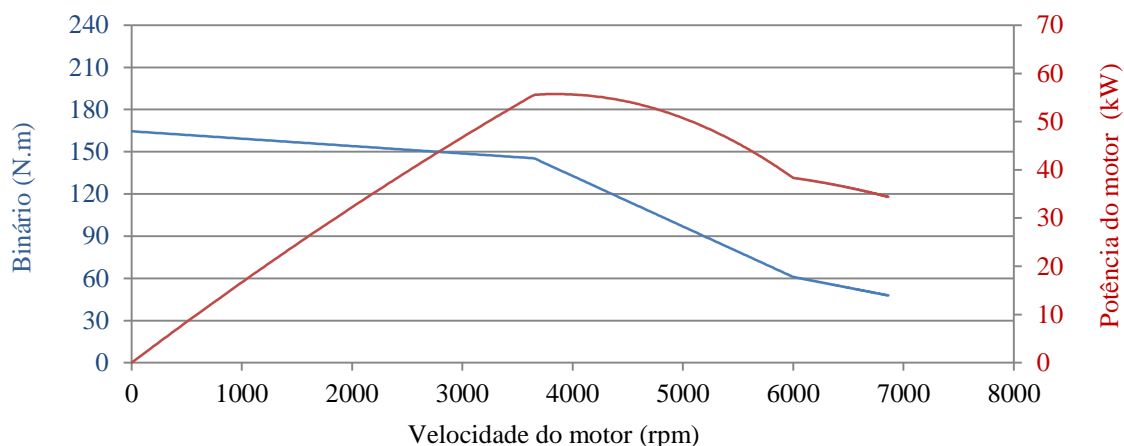


Figura 8-2: Curva do binário motor e da potência *versus* velocidade de rotação em r.p.m..

Da Figura 8-2 observa-se que o binário e a potência desenvolvidas estão limitadas à máxima rotação atingida pelo motor que é de 6.863 r.p.m..

A distância percorrida pelo veículo em função do tempo é exposta na Figura 8-3.

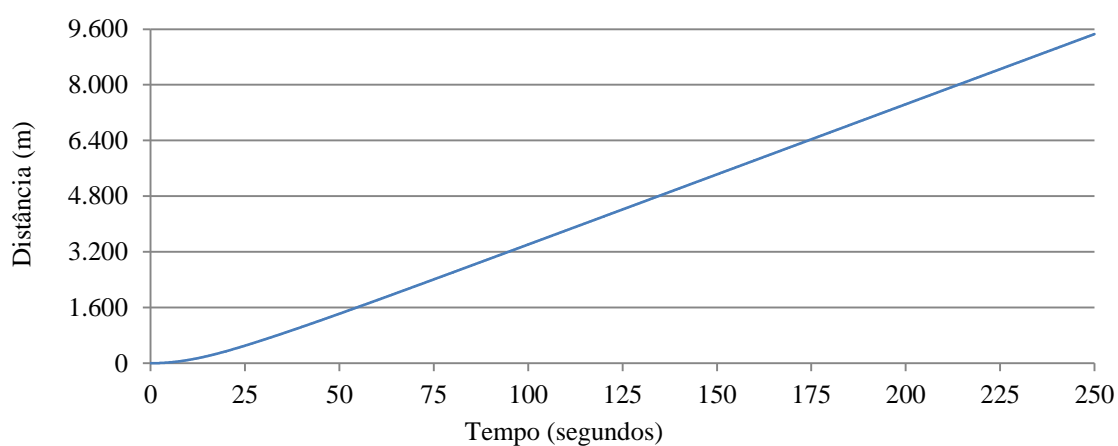


Figura 8-3: Distância percorrida pelo veículo (em metros) em função do tempo.

A Figura 8-4 apresenta a força útil ao movimento do veículo que resulta da diferença entre a força aplicada pelo motor às rodas e a soma das forças de atrito que interagem com este.

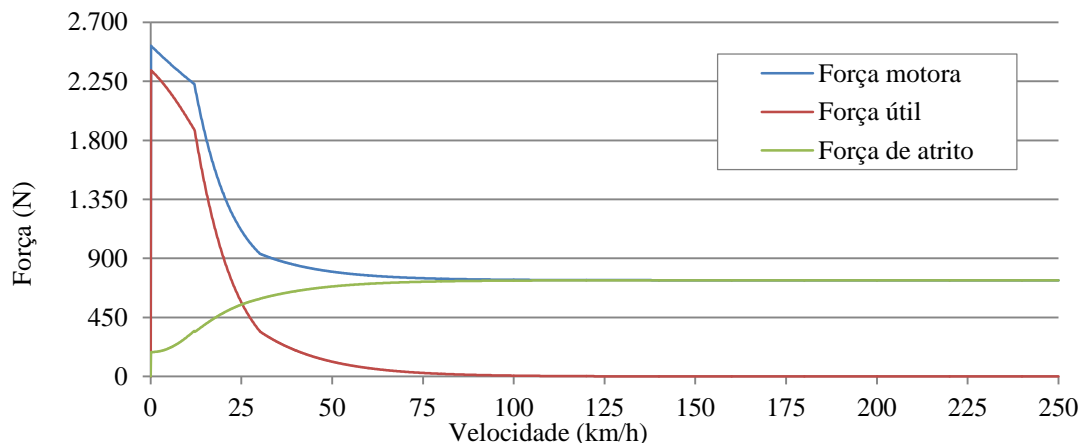


Figura 8-4: Força útil, que é a diferença entre a força motora e a força de atrito.

Da Figura 8-4 observa-se que a partir do instante em que o veículo atinge a máxima velocidade (75 segundos), a força motora é igual ao somatório das forças de atrito e o movimento passa a ser uniforme.

8.1.2 Caso estudo 2 - Deslocamento num plano inclinado

Com base no modelo matemático exposto em 6.4 é analisado o comportamento dinâmico do veículo para diferentes declives do pavimento, incluindo o plano horizontal. A massa considerada foi a mesma do caso estudo anterior, 1.197 kg.

As Figura 8-5, Figura 8-6 e Figura 8-7 exibem a aceleração instantânea, a velocidade máxima alcançável e a distância percorrida, respectivamente, em função da variação do declive do plano de deslocamento.

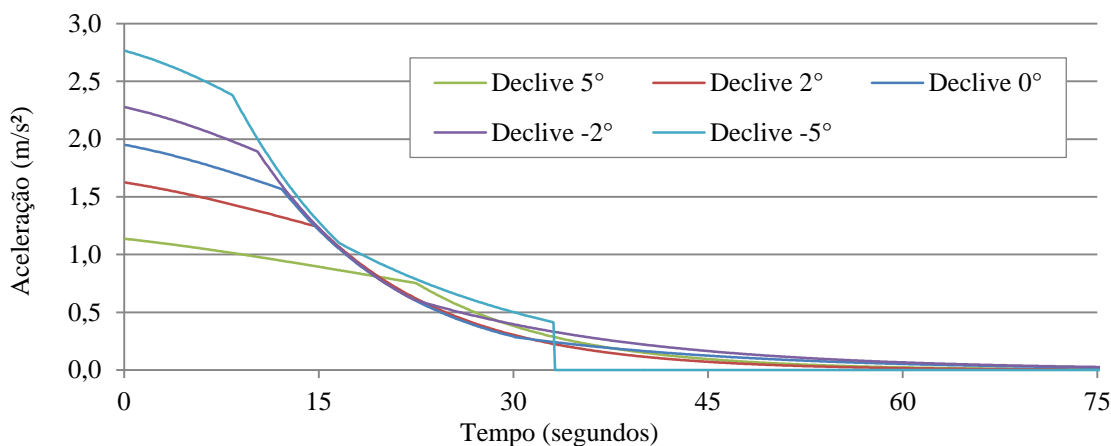


Figura 8-5: Variação da aceleração instantânea para diferentes declives.

Da Figura 8-5, concluiu-se que a aceleração adquirida pelo veículo é superior nas descidas (ângulos negativos). A partir do gráfico pode constatar-se que o extremo de cada intervalo da curva de binário, exibida na Figura 8-2, surge mais cedo para ângulos de inclinação negativa,

8 - Simulação das condições dinâmicas do veículo

o que se deve à maior aceleração. Com efeito, nas descidas o veículo tem um decréscimo da força de atrito devido à componente gravítica ser negativa e logo maior força útil.

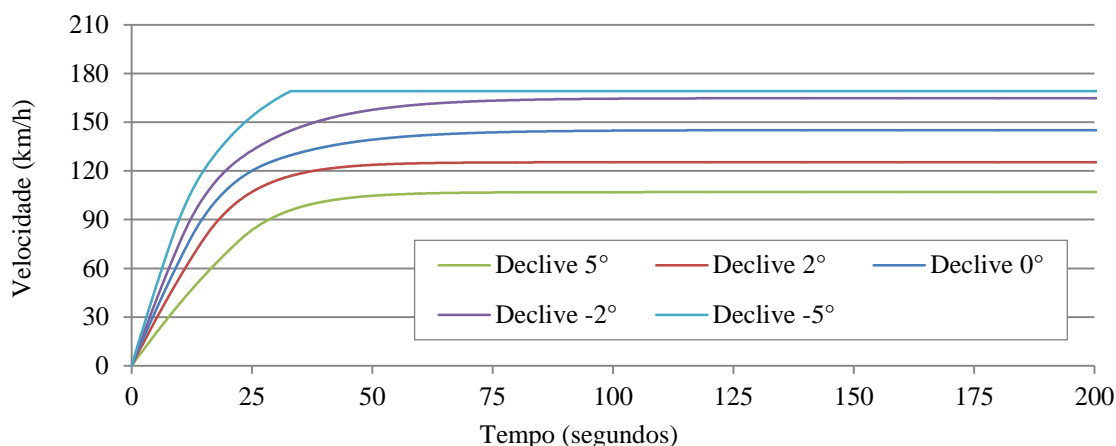


Figura 8-6: Variação da velocidade máxima atingível para diferentes declives.

Da análise da Figura 8-6 constata-se que a velocidade máxima alcançável é superior para planos com inclinação negativa. A força gravítica tem nas descidas uma ação adjuvante proporcional ao ângulo de inclinação.

É de salientar que a velocidade máxima do veículo depende da velocidade máxima da rotação do motor, que como se pode observar para a descida de inclinação de 5°, a partir de um dado instante alcança o valor máximo de 169 km/h. Da Figura 8-5 pode verificar-se que a partir desse instante (33 segundos) a aceleração é nula.

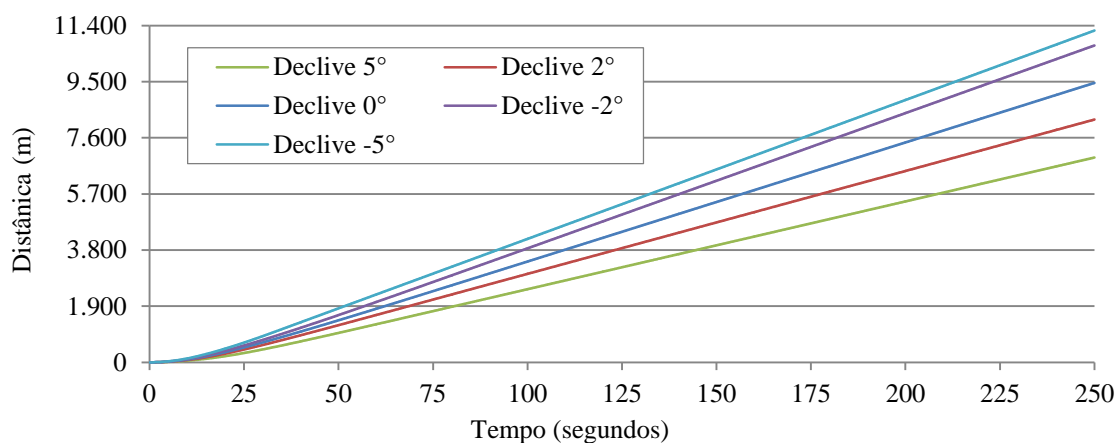


Figura 8-7: Variação da distância percorrida para diferentes declives.

Como se observa na Figura 8-7, a distância percorrida por unidade de tempo aumenta com a inclinação das descidas e diminuiu para as subidas.

8.1.3 Caso estudo 3 – Deslocamento com alteração da massa do veículo

Com base no modelo matemático apresentado em 6.4 é analisado nesta secção o comportamento dinâmico do veículo em função da alteração da sua massa ou do número de ocupantes. Esta simulação foi realizada apenas para o plano horizontal, uma vez que é já conhecido o efeito do declive sobre o desempenho do veículo.

As Figura 8-8, Figura 8-9 e Figura 8-10 apresentam a aceleração instantânea, a velocidade máxima alcançável e a distância percorrida por unidade de tempo, respectivamente, para massas diferentes.

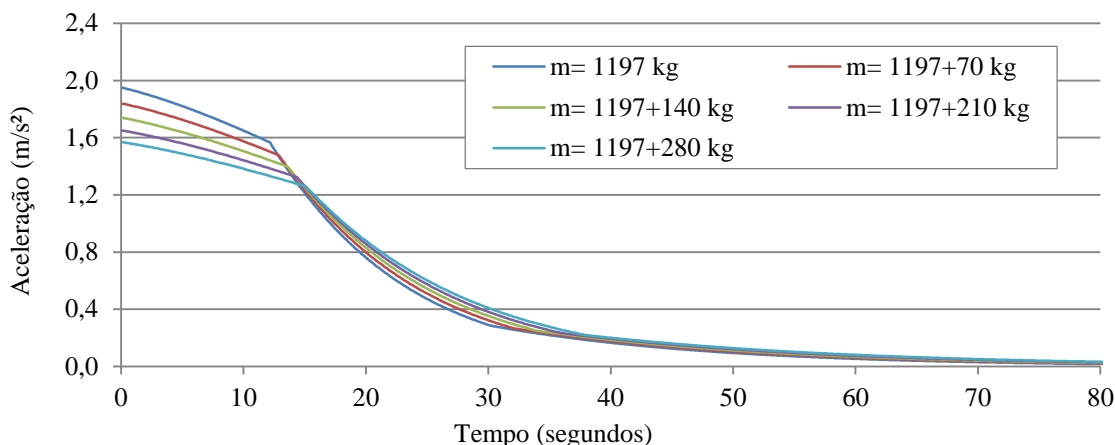


Figura 8-8: Variação da aceleração instantânea para diferentes massas ou número de ocupantes.

O estudo exposto em 3.1.4 permite concluir que as variações de aceleração evidenciadas na Figura 8-8 devem-se à alteração do atrito de inércia.

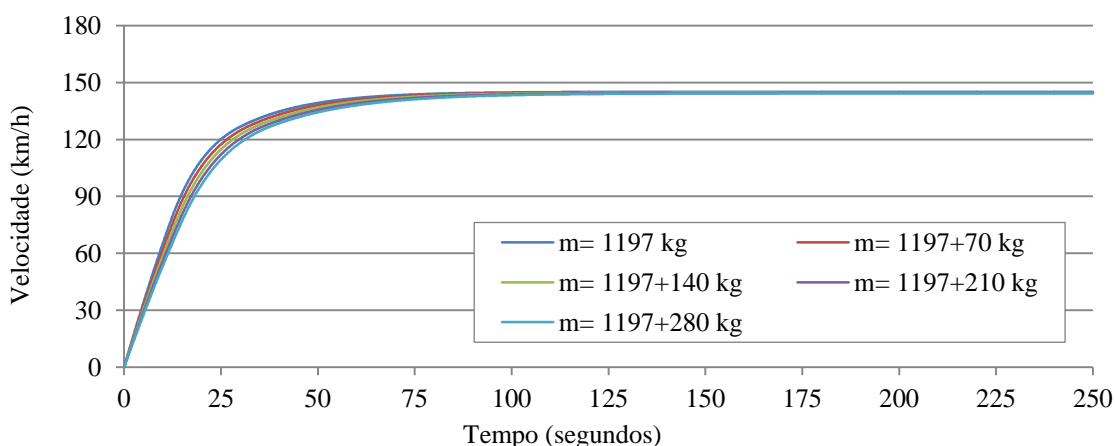


Figura 8-9: Variação da velocidade máxima alcançável para diferentes massas ou número de ocupantes.

Da Figura 8-9 constata-se que o aumento da massa repercute-se em mais tempo para que o veículo alcance a velocidade máxima. Com efeito, a velocidade uniforme é alcançada mais cedo para o veículo com menor massa.

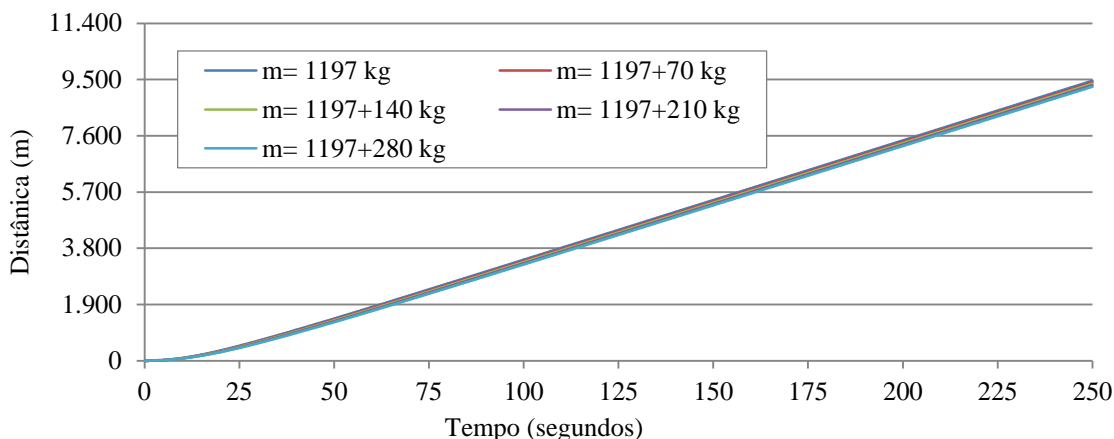


Figura 8-10: Variação da distância percorrida para diferentes massas ou número de ocupantes.

Da Figura 8-10 pode constatar-se que a variação do número de ocupantes tem um impacto desprezável na distância percorrida no plano horizontal.

8.1.4 Caso de estudo 4 – Deslocamento num plano inclinado com alteração da massa do veículo

A partir do caso estudo anterior concluiu-se que a massa constitui um parâmetro praticamente irrevalente no desempenho quando o veículo se desloca no plano horizontal. Nesta secção é estudado o efeito da sua alteração sobre o comportameto dinâmico do veículo para diferentes inclinações de descida, subida e plano horizontal.

As Figura 8-11, Figura 8-12 e Figura 8-13 mostram a variação da aceleração instantânea, velocidade máxima alcançável e distância percorrida para diferentes declives e massas.

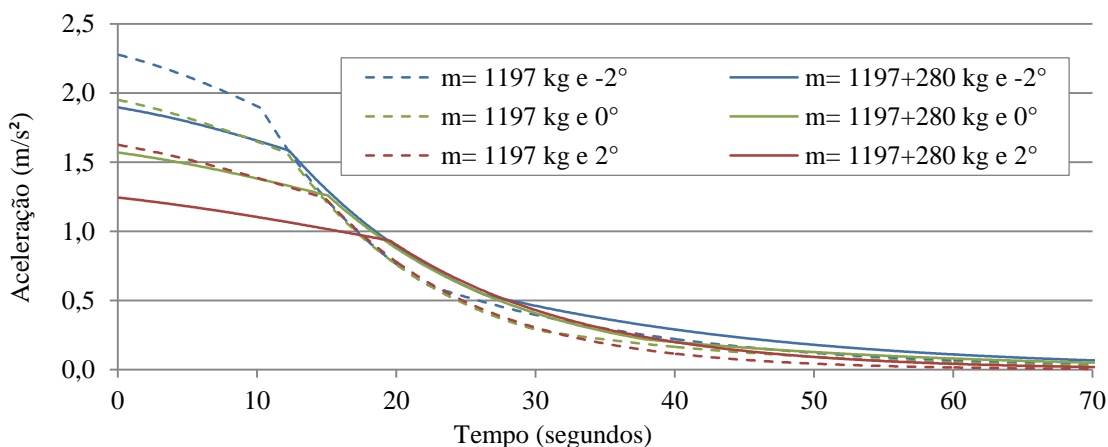


Figura 8-11: Variação da aceleração instantânea para diferentes declives e diferentes massas.

Da figura constata-se que a aceleração inicial é maior para o veículo com menor massa deslocando-se num plano com inclinação negativa e é menor para o veículo com maior massa quando se desloca num plano com inclinação positiva.

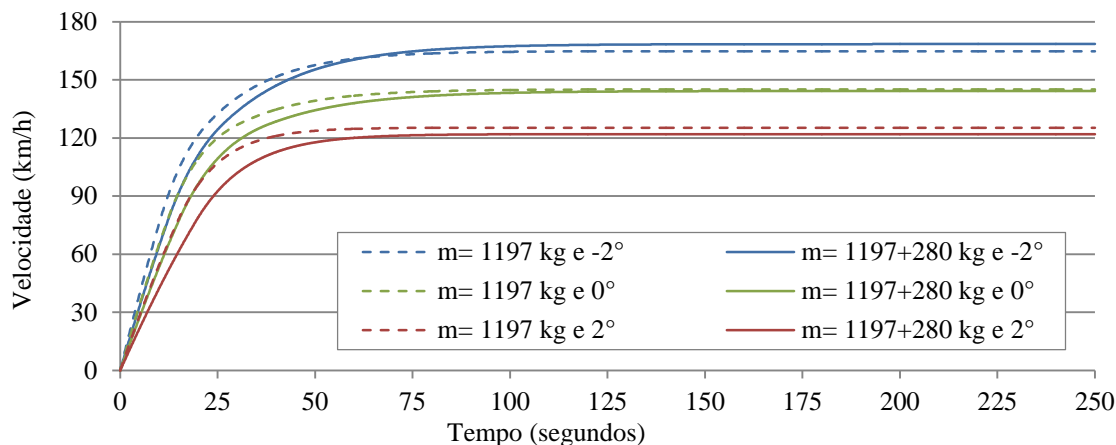


Figura 8-12: Velocidade alcançável para diferentes declives e massas.

Da Figura 8-12 verifica-se que a alteração da massa do veículo tem um maior impacto na velocidade máxima alcançável para os planos inclinados, enquanto que no plano horizontal interfere sobretudo com o tempo necessário para que essa seja alcançada. Para o plano de inclinação negativa observa-se que, a partir de um determinado instante, a velocidade do veículo de massa maior alcança a de massa menor, deslocando-se a partir daí com velocidade superior. Conforme exposto em 3.1, nas subidas a força gravítica oferece uma resistência ao movimento do veículo, enquanto que nas descidas tem uma ação adjuvante, aumentando com a massa.

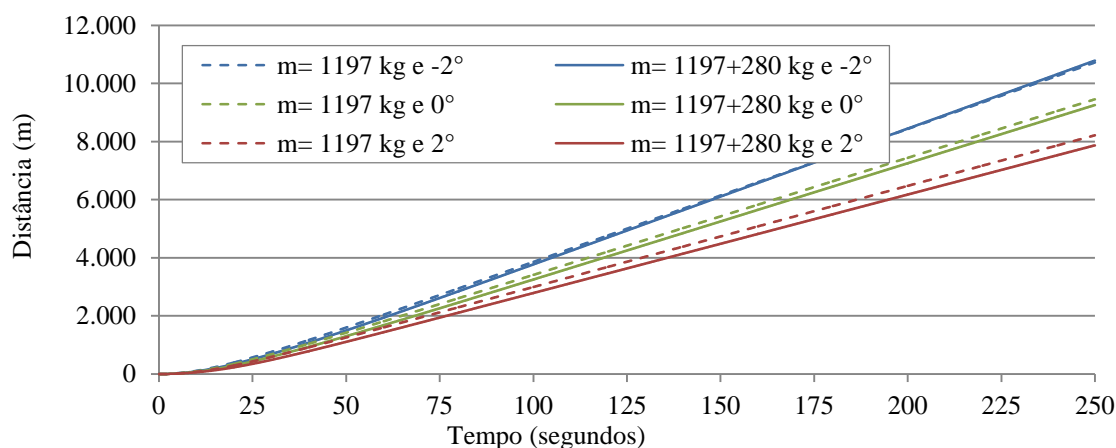


Figura 8-13: Variação da distância percorrida para diferentes declives e diferentes massas.

Da Figura 8-13 concluiu-se que a variação da massa tem uma maior influência na redução da distância percorrida nas subidas.

8.2 Simulação do consumo energético e impacto ambiental

De acordo com o exposto no capítulo 3 foi desenvolvida também uma aplicação em Matlab (ver Anexo 3) para simular o ciclo de condução NEDC, por forma a conhecer o consumo energético e o nível de emissões de CO₂ na utilização do veículo em estudo.

Na Figura 8-14 são expostos os principais elementos da cascata de potência do veículo e alguns parâmetros necessários para este estudo. Para a bateria foi considerada uma eficiência de carga/descarga de 90% tendo por base o valor típico disponibilizado na literatura [80]. Os restantes parâmetros utilizados na simulação são os que constam no Quadro 6-1.

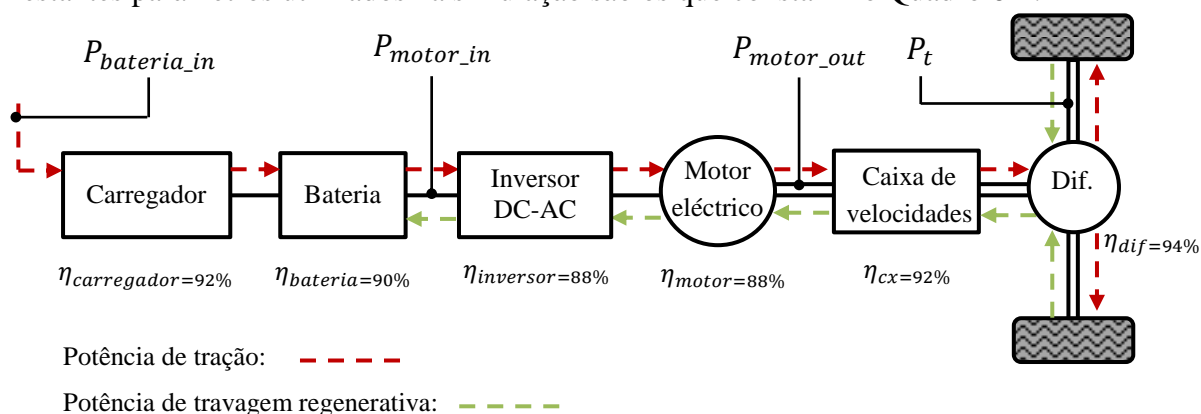


Figura 8-14: Principais componentes do *Power Drive*.

De acordo com o estipulado pela norma NEDC, a massa considerada nesta simulação foi de 1.272 kg, correspondente à tara do veículo mais um acréscimo de 145 kg, que inclui o peso do condutor, da bagagem e do pneu sobressalente [81].

8.2.1 Análise dos parâmetros do ciclo de condução

Neste secção são expostos alguns dos parâmetros que derivam do ciclo de condução NEDC, necessários ao cálculo da energia consumida pelo veículo e ao impacto ambiental que resulta da sua utilização. Estes são a aceleração instantânea e a máxima distância percorrida, como a seguir se apresentam.

Na Figura 8-15 podem observar-se as especificações do ciclo NEDC, com a velocidade em função do tempo ao longo de 19,7 minutos.

8 - Simulação das condições dinâmicas do veículo

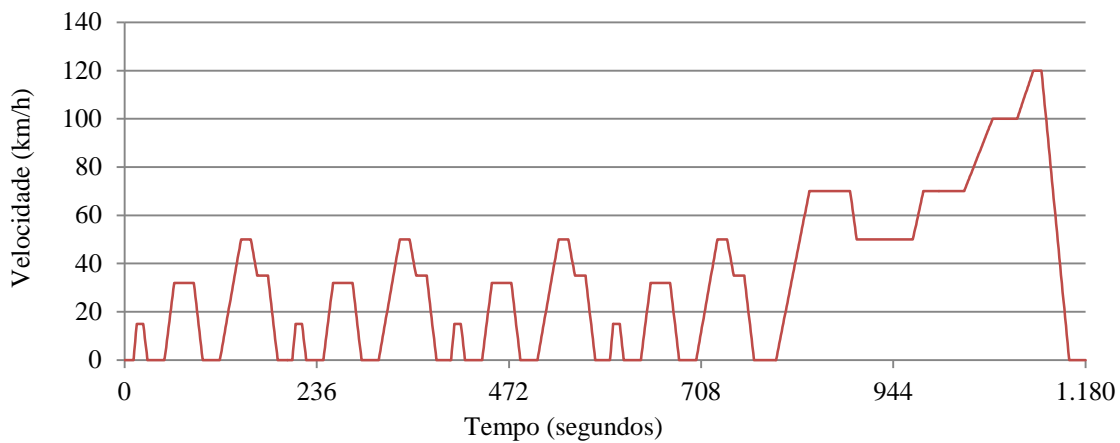


Figura 8-15: Novo ciclo de condução europeu (NEDC).

Na Figura 8-16 e Figura 8-17 são exibidas a aceleração instantânea e a máxima distância percorrida durante o cumprimento do ciclo NEDC.

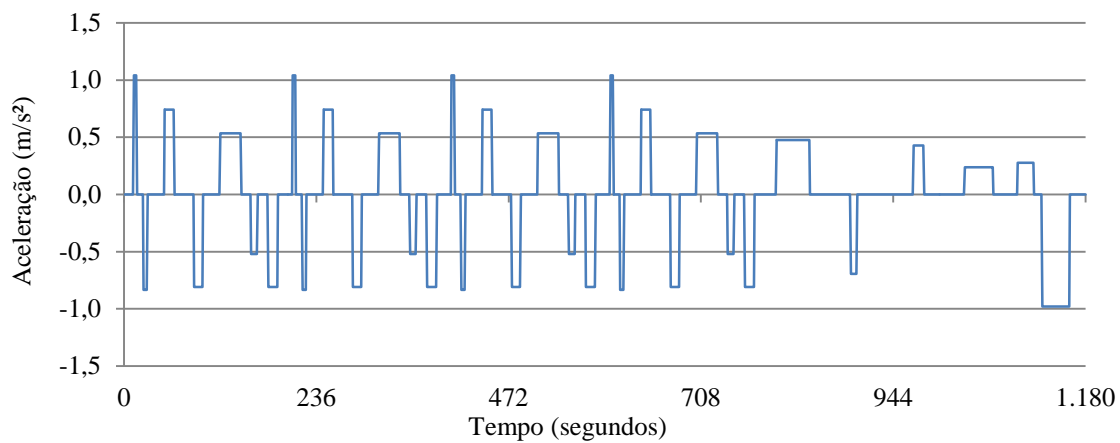


Figura 8-16: Evolução da aceleração instantânea.

Os resultados da simulação permitiram identificar que a maior aceleração adquirida pelo veículo foi de $1,042 \text{ m/s}^2$.

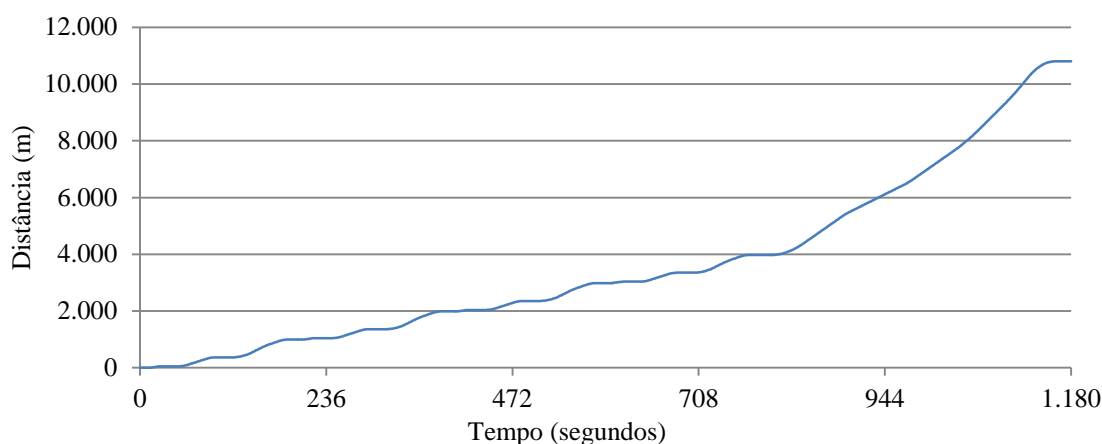


Figura 8-17: Evolução da distância percorrida em função do tempo.

A distância percorrida pelo veículo foi de 10.798 metros, como se observa na Figura 8-17.

8.2.2 Análise do consumo energético

Conhecidas as condições dinâmicas do veículo, exibe-se na Figura 8-18 a força de tração necessária a aplicar pelas rodas, para que o veículo se desloque à velocidade especificada para um determinado instante do ciclo NEDC.

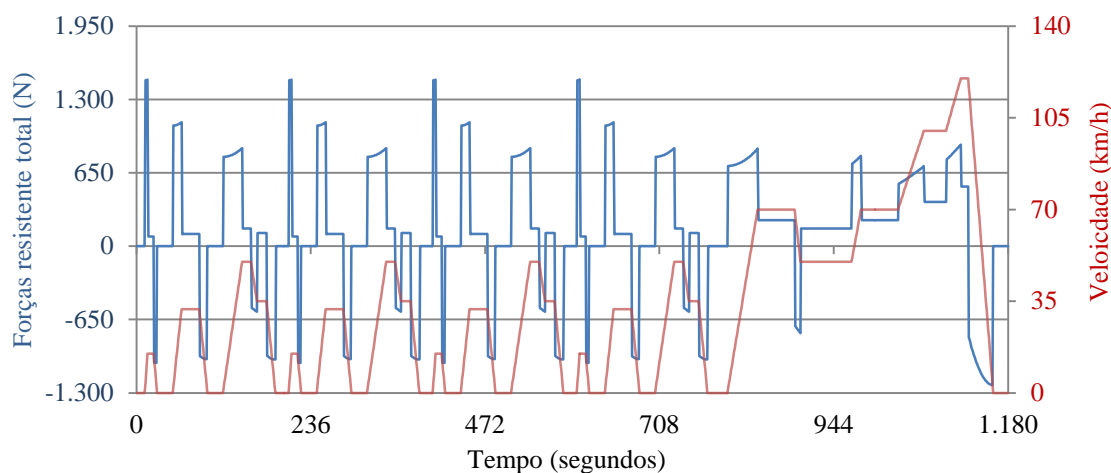


Figura 8-18: Evolução do somatório das forças resistentes e velocidade ao longo do tempo.

Da Figura 8-18 verifica-se que durante as acelerações é aplicada uma força de tração nas rodas com sentido contrário ao das forças resistentes que atuam no veículo, daí surgir com sinal positivo. Nas desacelerações é aplicada nas rodas uma força de sinal negativo, o que significa que as forças resistentes têm uma ação adjuvante. Esta deve-se ao atrito de inércia, que é tanto maior quanto maior for a desaceleração, conforme visto em 3.1. Quando o veículo se desloca com velocidade uniforme observa-se que a força aplicada é constante, uma vez que as condições dinâmicas permanecem inalteradas.

8 - Simulação das condições dinâmicas do veículo

Do produto da velocidade e com o somatório das forças resistentes é possível conhecer a potência mecânica despendida nas rodas em cada instante para alcançar uma determinada velocidade, apresentada na Figura 8-19.

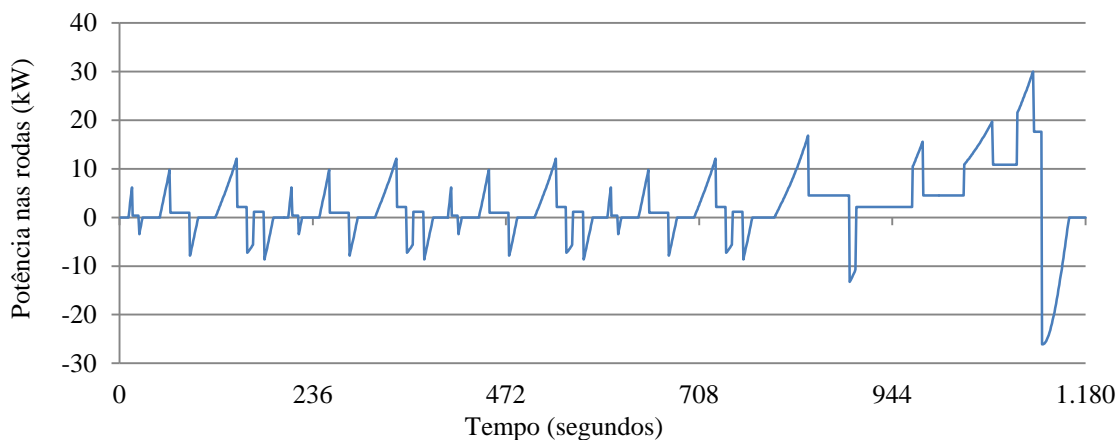


Figura 8-19: Potência mecânica fornecida às rodas em função do tempo.

Da Figura 8-19 verifica-se que a potência é positiva quando o veículo acelera ou se desloca com velocidade constante. Quando o veículo desacelera a sua inércia produz uma potência de valor negativo que pode ser regenerada para a recarga da bateria e assim contribuir para a diminuição do consumo energético líquido do veículo.

Na Figura 8-20 exibem-se a evolução de algumas das potências expostas na Figura 8-14.

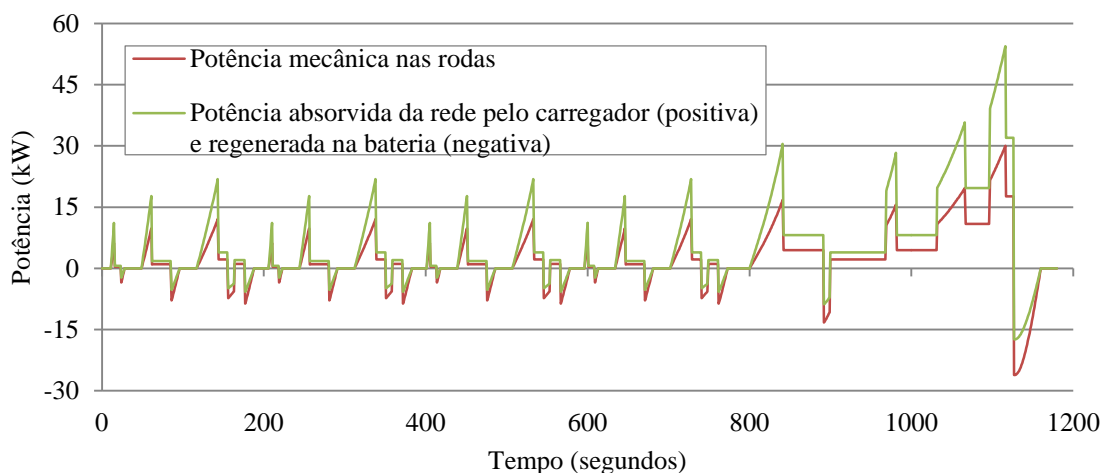


Figura 8-20: Evolução das potências.

Da Figura 8-20 constata-se que a potência absorvida de valor positivo refere-se à potência que é fornecida ao carregador para a tração do veículo quando se desloca com velocidade uniforme ou com movimento acelerado. A potência absorvida de valor negativo corresponde à potência que é regenerada e armazenada na bateria, resultante da ação adjuvante das forças resistentes durante as desacelerações.

Repare-se que as equações expostas em 6.4 apenas se aplicam quando a potência mecânica nas rodas é positiva, ou seja, na situação em que o motor desenvolve tração. Se o motor for

8 - Simulação das condições dinâmicas do veículo

utilizado para reduzir a velocidade do veículo, a potência mecânica nas rodas é negativa e as eficiências (ou rendimentos) da cascata do *Power Drive* têm o efeito oposto, equação (8-1).

$$P_{bateria_in} = P_{mecânica} \times \eta_{powerdrive} \quad (8-1)$$

Isto significa que apenas uma parte da potência mecânica regenerada nas rodas constituiu energia útil para a recarga da bateria, como se expõe na Figura 8-20.

A Figura 8-21 exibe a energia que é necessário fornecer ao carregador (gráfico a azul) para que a bateria a disponibilize ao controlador e o veículo se desloque a uma determinada velocidade; e a energia que é recuperada por travagem regenerativa (gráfico a verde).

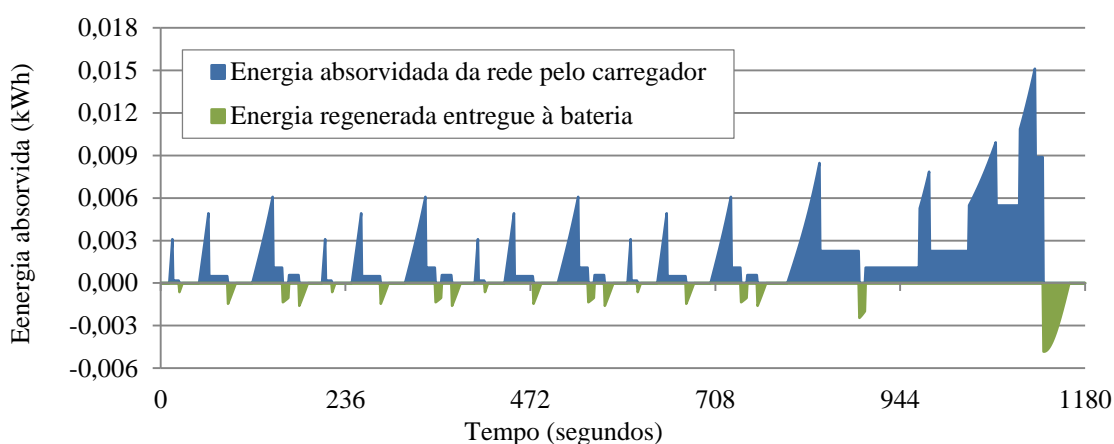


Figura 8-21: Evolução da energia consumida e regenerada.

Na Figura 8-22 pode observar-se a evolução do consumo acumulado de energia ao longo do ciclo NEDC.

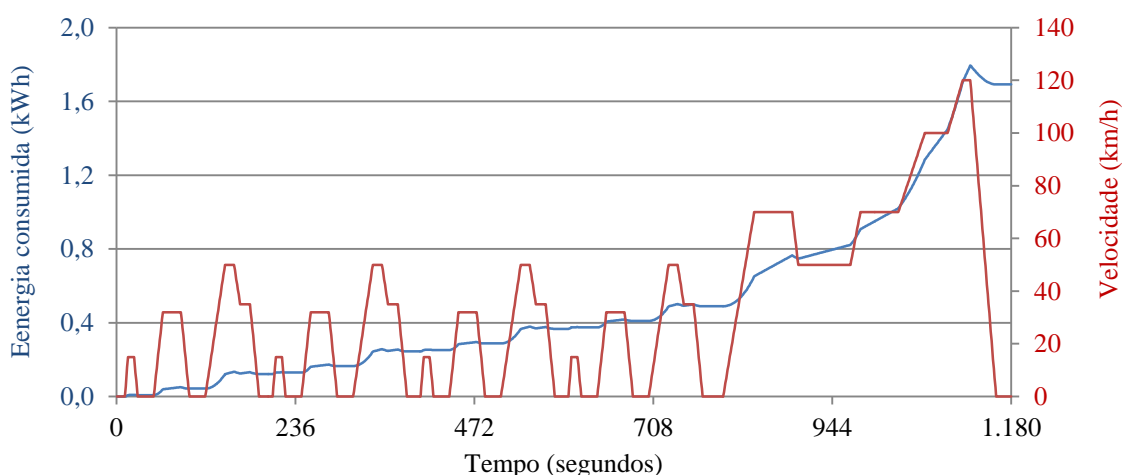


Figura 8-22: Evolução da energia consumida acumulada em função do tempo *versus* velocidade.

Da Figura 8-22 podem observar-se ligeiras reduções do consumo energético durante as desacelerações, devidas à recuperação de energia por travagem regenerativa. A estimativa da energia consumida da rede por este veículo num ciclo de condução NEDC é de 1,692 kWh.

8.2.3 Análise do impacto ambiental

Como foi referido atrás, as emissões de CO₂ de um veículo eléctrico dependem do *mix* de geração do sistema electroprodutor de onde este é abastecido. A rotulagem da energia eléctrica em Portugal Continental disponibilizada pela EDP, relativa ao ano de 2014, apresentou uma taxa de emissões de 122,47 gCO₂/kWh. Em 2013 esse valor foi de 141,58 gCO₂/kWh [82]. Esta redução deveu-se aos menores consumos e aumento da produção de com fontes renováveis, representando atualmente mais de 60% da energia produzida. Em face das políticas energéticas em curso, espera-se a redução continuada das emissões de CO₂ por kWh, refletindo-se essa num menor impacto ambiental do sector dos transportes e menor dependência energética ao exterior.

No cumprimento do ciclo NEDC, o veículo percorreu uma distância de 10,798 km com um gasto energético de 1,692 kWh. Com base nestes dados concluiu-se que para percorrer 100 km serão necessários 15,67 kWh.

$$\frac{1,692 \times 100}{10,798} = 15,67 \text{ kWh}$$

Com base na rotulagem da energia eléctrica referente ao ano de 2014, o valor das emissões de CO₂ por 100 km é:

$$15,67 \text{ kWh} \times 0,12247 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = 1,92 \text{ kgCO}_2$$

Concluiu-se assim que, do ponto de vista da utilização, o veículo eléctrico projetado é responsável pela emissão em média de 19,2 gCO₂ por quilómetro percorrido.

8.2.4 Cálculo da autonomia com base no ciclo NEDC

A autonomia do veículo eléctrico depende da capacidade da bateria e do consumo energético, já determinado com base no ciclo de condução NEDC. Considerando que apenas pode ser utilizada 80% (DoD) da energia por esta armazenada, a energia útil é de:

$$80\% \times 28,7 \text{ kWh}^2 = 22,96 \text{ kWh}$$

Sabendo que o veículo consome 1,692 kWh para percorrer uma distância de 10,798 km, a autonomia alcançada nestas condições é de:

$$\frac{10,798 \text{ km} \times 22,96 \text{ kWh}}{1,692 \text{ kWh}} = 146,53 \text{ km}$$

Constata-se assim que, nas condições de circulação do ciclo NEDC, o veículo pode percorrer uma distância de 146,53 km com o consumo de 22,96 kWh de energia extraída da rede e armazenada na bateria.

² Energia armazenada pela bateria projetada em 7.4 (Quadro 7-3).

9. Custo de transformação do veículo

Neste capítulo é apresentada uma estimativa do custo de electrificação do sistema propulsor do Honda *Civic Coupé EX* para comparação com outros veículos eléctricos atualmente em comercialização.

9.1 Estimativa de orçamento

No Quadro 9-1 apresenta-se uma estimativa dos custos de conversão, discriminado pelos componentes.

O facto de não ser possível realizar os trabalhos de conversão e montagem do veículo impede de apurar com rigor estes valores, uma vez que os custos com a cablagem, elementos de fixação e mão-de-obra não são conhecidos. Como se pode observar pelo quadro, devido ao preço da bateria (células + BMS e instrumentação + encapsulamento) se situar acima dos 13.000 €, este valor é ainda economicamente proibitivo para esta alternativa.

Quadro 9-1: Estimativa do orçamento para conversão do veículo em eléctrico.

Componente	Preço
Veículo Honda Civic Coupé EX de 1996	1500,00 €
Motor e controlador <i>Curtis 1238-7601 HPEVS</i>	5.161,85 €
Kit de refrigeração líquida com ventilação <i>EV West</i>	282,44 €
Placa de refrigeração líquida <i>Curtis</i>	137,24 €
Termóstato <i>EV West: 12 V DC</i>	43,38 €
Bomba de vácuo <i>SSBC: 12V DC</i>	254,99 €
Transdutor de pressão de travão <i>EV West: 0 a 1000 psi</i>	87,65 €
Potenciómetro de aceleração <i>Evnetics Billet: 5V DC</i>	211,61 €
Conversor DC-DC <i>Elcon: 400 W; 13,5 V</i>	202,76 €
Carregador <i>Elcon PFC2500</i>	645,45 €
Bateria: células Panasonic NCR18650B fornecidas por OrbTronic ¹	10.644,70 €
Kit <i>Elithion Lithiumate Pro BMS</i> : incluiu 66 <i>cell boards</i> , 2 sensores de corrente <i>Tamura</i> de 40 A e de 600 A (Ref. ^a 6CS0XX0K) e <i>display</i> (Ref. ^a 6DS0020P) ²	2.235,76 €
Encapsulamento: 238 unidade de 10 peças de suporte com 2 speradores ³	421,45 €
Cablagem e montagem no veículo: <i>SPMAQ</i>	2.500,00 €
Custo total	24.329.28 €

Fonte: “EV-West”, (<http://www.evwest.com/>);

¹“Fasttech”, (<https://www.fasttech.com/products/1420/10001980/1141100>);

²“Elithion”, (http://elithion.com/lithiumate_ordering.php);

³“SuPowerBattery”, (<http://www.batterysupports.com/10pc-battery-spacer-seperator-2x-18650-radiating-battery-holder-p-329.html>).

Existem hoje veículos eléctricos no mercado com custo mais baixo, contudo é de salientar que a aquisição de componentes encontrados tem preços elevados dada a ausência de capacidade de negociação junto dos fornecedores, devida às baixas quantidades requeridas.

10. Conclusão e trabalhos futuros

A autonomia proporcionada pelas tecnologias de armazenamento de energia constituía até há pouco tempo um factor limitador para a mais rápida penetração dos veículos eléctricos (VEs). Com o desenvolvimento operado nos últimos anos nas baterias, estas alcançaram uma evolução que permite hoje aos VEs exhibir uma autonomia cada vez mais adequada às necessidades de mobilidade diárias da maioria dos cidadãos e desempenhos dinâmico e ambiental muito superiores ao da tecnologia convencional. O principal inibidor para a mais rápida adopção é ainda o seu preço, mas que tem vindo a diminuir continuamente em resultado da massificação e da optimização de todos os factores de produção, possibilitando à alternativa eléctrica ser cada vez mais competitiva em termos de custo por quilómetro percorrido.

A aposta na mobilidade eléctrica assenta num vector energético alternativo às fontes fósseis e integra-se numa mudança de paradigma no sector dos transportes, com base na exploração crescente de energia renovável, que visa incrementar a sua eficiência energética, reduzir o impacto ambiental e a dependência de outros países; como foi demonstrado com os estudos referidos no texto e o desenvolvimento deste trabalho.

Os condicionalismos económicos, a instabilidade do custo do petróleo e as responsabilidades sociais impostas pelas políticas energéticas em curso potenciam cada vez mais a procura de modos de mobilidade menos dispendiosos. Há ainda a salientar os incentivos governamentais à aquisição de VEs que pretendem facilitar a adopção deste tipo de mobilidade e que em países como Portugal, não possuidores de recursos fósseis, podem vir a desempenhar um papel crucial na redução da factura da energia importada e na sua dependência energética do exterior, promovendo a crescente exploração de fontes de energia endógena.

A presente dissertação procurou contribuir para a disseminação do conhecimento do comportamento dinâmico dos VEs, com um rigoroso estudo da cinemática do veículo automóvel para diferentes cenários com alteração da massa e da inclinação da superfície de deslocamento.

Foi também possível identificar a importância de um BMS como parte crucial num sistema de armazenamento de energia e de garantia da fiabilidade e segurança de um VE, repercutindo-se na sua performance e longevidade. Esta unidade garante a operação dentro das condições que prolongam a vida útil da bateria e maximizam a energia disponível em cada ciclo de carga e de descarga, que em ambiente automóvel estão fortemente dependentes das condições de circulação e climáticas.

Com os resultados da simulação conclui-se que a variação da massa tem uma ação muito menos significativa em termos de desempenho dinâmico e consumos energéticos que o declive do pavimento. Com efeito constata-se que é necessário despender muito mais energia nas subidas, mas com maior potencial de regeneração também nas descidas.

Concluiu-se também que a alternativa de converter um veículo convencional num BEV não é atrativa do ponto de vista económico. A dificuldade em adquirir componentes homologados para uso na indústria automóvel, com qualidade e preço idêntico aos conseguidos pelos grandes fabricantes tornam essa operação extremamente difícil de concretizar.

Como se depreende este trabalho não constitui uma solução acabada, existem aspectos que podem ser melhorados à medida que as tecnologias evoluem e que consistem na:

- Construção do protótipo da bateria e montagem do BMS com instrumentação de supervisão;
- Electrificação do veículo com base no *power drive* projetado para comparação com os resultados obtidos nas simulações;
- Desenvolver um sistema solar fotovoltaico para auxílio da recarga da bateria da instrumentação a bordo;
- A diminuição do volume e peso da bateria que pode ser conseguido com substituição das células atuais por tecnologia com maior densidade de energia;
- Desenvolver uma aplicação em MATLAB para a simulação do funcionamento da bateria e dos mecanismos de proteção e controlo do BMS;
- A inclusão de instrumentação que permita fornecer em tempo real o consumo energético e o nível de emissão de CO₂ e sistema com GPS para informar do perfil de velocidade e inclinação do pavimento para comparação com os resultados da simulação.

Em suma, foi concretizado o projeto de conversão de um automóvel convencional em veículo eléctrico. O veículo dispõe das mesmas funcionalidades do veículo original e mostra-se capaz de proporcionar autonomia e performance comparável à de modelos similares, permitindo alcançar velocidades superiores a 120 km/h em subidas, até 2°, e com uma carga equivalente ao peso de cinco ocupantes. Apesar de ser uma aposta economicamente inviável, espera-se que com as produções em massa que se anunciam para um futuro próximo, o custo possa vir a ter um valor praticável.

REFERÊNCIAS

- [1] Zachary Shahan; “*Electric car history*”, disponível em: <http://cleantechnica.com/2015/04/26/electric-car-history/>, acessado em 30 de julho de 2015.
- [2] Edison tech center; “*Electric Cars*”, disponível em: <http://www.edisontechcenter.org/ElectricCars.html>, acessado em 6 de dezembro de 2014.
- [3] Pedro Vacas; “*Porsche elétrico de 1900*”, disponível em: <http://pelanatureza.pt/mobilidade/noticias/porsche-electrico-de-1900>, acessado em 6 de dezembro de 2014.
- [4] “*The history electric car*”, disponível em: <http://energy.gov/articles/history-electric-car>, acessado em 10 de dezembro de 2014.
- [5] Eric Loveday; “*Inside EV’s – Plug in vehicles to represent 3 of global automotive market by 2020 phev sales to easily to outnumber sales of bevs in US*”, disponível em: <http://insideevs.com/plug-in-vehicles-to-represent-3-of-global-automotive-market-by-2020-phev-sales-to-easily-to-outnumber-sales-of-bevs-in-us/>, acessado em 8 de dezembro de 2014.
- [6] Sheldon S. Williamson; “*Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*”, ISBN 978-1-4614-7711-2, Springer, 2013.
- [7] Nissan; “*Nissan Leaf 2015*”, disponível em: <http://www.petersnissanofnashua.com/custom/2015-nissan-leaf-dealer-serving-manchester/Nashua-NH-Nissan-Dealer>, acessado em 2 de janeiro de 2015.
- [8] BMW; “*New i3 2015*”, disponível em: <http://www.brianjesselbmw.com/en/new/i3/2015/http://www.brianjesselbmw.com/en/new/i3/2015/>, acessado em 2 de janeiro de 2015.
- [9] “*Toyota of orange - 2015 Toyota Prius*”, disponível em: <http://www.toyotaoforange.com/2015-toyota-prius-dealer-in-orange-county.htm>, acessado em 3 de janeiro de 2015.
- [10] “*Utah Clean Cities - Electric Vehicles*”, disponível em: <http://utahcleancities.org/electric-vehicles>, acessado em 9 de agosto de 2015.
- [11] “*Sistema de propulsión del chevrolet volt*”, disponível em: <http://www.cise.com/portal/notas-tecnicas/item/734-sistema-de-propulsi%C3%B3n-del-chevrolet-volt.html>, acessado em 30 de dezembro de 2014.
- [12] “*WEBB - 2015 Chevrolet Volt*”, disponível em: <http://www.webbchevroletoaklawn.com/2015-Chevrolet-Volt-dealer-serving-Chicago>, acessado em 3 de janeiro de 2015.

- [13] James Larminie e John Lowry; “Electric Vehicle Technology Explained”, 2ª edição, ISBN-978-1-119-94273-3, John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [14] M. Ehsani, Y. Gao e A. Emadi; “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design”, 2ª edição, Taylor & Francis Group, 2010.
- [15] “FLO Cyling - The Contact Patch Why Wider is Better”, disponível em: <http://flocycling.blogspot.pt/2011/11/flo-cyling-contact-patch-why-wider-is.html>, acessado em 29 de dezembro de 2014.
- [16] “FLO Cyling - How Velocity Affects Drag”, disponível em: <http://flocycling.blogspot.pt/2011/11/flo-cyling-how-velocity-effects-drag.html>, acessado em 4 de janeiro de 2015.
- [17] “VIVA F1”, disponível em: <http://www.vivaf1.com/glossary.php>, acessado em 6 de janeiro de 2015.
- [18] “Dinâmica da rotação - uma abordagem para o estudante do nível médio”, disponível em: <http://pir2.forumeiros.com/h34-dinamica-da-rotacao-para-o-nivel-medio-parte-1>, acessado em 8 de janeiro de 2015.
- [19] “Rolling Without Slipping”, disponível em: <https://www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/rotational-kinematics-angular-momentum-and-energy-9/rotational-kinematics-83/rolling-without-slipping-324-1131/>, acessado em 9 de janeiro de 2015.
- [20] “e-física - Movimento de rotação”, disponível em: http://efisica.if.usp.br/mecanica/basico/corpos_rigidos/rotacoes/, acessado em 11 de janeiro de 2015.
- [21] “Peso das fontes de produção de electricidade em Portugal Continental em 2014”, disponível em: <http://www.apren.pt/pt/dados-tecnicos-3/dados-nacionais-2/producao-2/a-producao-de-electricidade-em-portugal-2/1-3-12/peso-das-fontes-de-producao-de-electricidade-em-portugal-continental-em-2014/>, acessado em 26 de janeiro de 2015.
- [22] “Nota Positiva: 1ª e 2ª Lei da Termodinâmica”, disponível em: http://www.notapositiva.com/pt/textapoiobs/fisica/10_1_e_2_lei_da_termodinamica_d.htm, acessado em 29 de janeiro de 2015.
- [23] “Eficiência Energética e Integração Sustentada de PRE - Armazenamento de Energia”, UC- ISR-Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores, 2006.
- [24] “Splung - Electrical Cells and Batteries”, disponível em: <http://www.splung.com/content/sid/3/page/batteries>, acessado em 28 de abril de 2015.
- [25] Davide Andrea; “Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs”, ISBN-13 978-1-60807-104-3, Artech House, 2010.
- [26] Electric Vehicle Team; “A Guide to Understanding Battery Specifications”, Massachusetts Institute of Techonogy, 2006.

REFERÊNCIAS

- [27] “Battery University - Types of batteries cells”, disponível em: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells, acessado em 12 de fevereiro de 2015.
- [28] “Lowering costs of lithium-ion batteries for EV power trains”, Disponível em: <http://sustainablemfr.com/energy-efficiency/lowering-costs-lithium-ion-batteries-ev-power-trains>, acessado em 15 de março de 2015.
- [29] “Battery and Energy Technologies”, disponível em: http://www.mpoweruk.com/cell_construction.htm, acessado em 12 de março de 2015.
- [30] “Battery types used in portable and solar lighting”, disponível em: <http://www.ledwatcher.com/battery-types-used-in-portable-and-solar-lighting/>, acessado em 12 de fevereiro de 2015.
- [31] “Battery University - What's the best battery”, disponível em: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery, acessado em 13 de fevereiro de 2015.
- [32] “Battery University - Types of Lithium-ion”, disponível em: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion, acessado em 13 de fevereiro de 2015.
- [33] André Luis Lenz; “Baterias de íons de Lítio - Tecnologias e Bases de Custos”, disponível em: <http://automoveiseletricos.blogspot.pt/2012/07/baterias-de-ions-de-litio-tecnologias-e.html>, acessado em 14 de fevereiro de 2015.
- [34] “Breaking: Nissan prices Leaf battery replacement at \$5.499, New packs more heat durable”, disponível em: <http://insideevs.com/breaking-nissan-prices-leaf-battery-replacement-5499-new-packs-heat-durable/>, acessado em 10 de abril de 2015.
- [35] Peter Bronski; et al; “The economics of load defection”, Rocky Mountain Institute, Technical Reports, abril de 2015.
- [36] Jeff John; “The Local and Global Impact of Tesla's Giga Factory”, disponível em: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/The-Local-and-Global-Impact-of-Teslas-Giga-Factory>, acessado em 18 de fevereiro de 2015.
- [37] “Envia Systems achieves world record energy density for rechargeable lithium-ion batteries”, disponível em: <http://www.emobility-web.de/articles/emobility-news-around-the-world/240/envia-systems-achieves-world-record-energy-density-for-rechargeable-lithium-ion-batteries>, acessado em 9 de março de 2015.
- [38] Wikerson Landim; “IBM cria bateria de Lítio-ar leve e com alta densidade”, disponível em: <http://www.tecmundo.com.br/bateria/22495-ibm-cria-bateria-de-litio-ar-leve-e-com-alta-densidade.htm>, acessado em 10 de março de 2015.
- [39] Kevin Bullis; “Advance Doubles the Longevity of High-Energy Electric Car Batteries”, disponível em: <http://www.technologyreview.com/news/534446/advance-doubles-the-longevity-of-high-energy-electric-car-batteries/>, acessado em 11 de março de 2015.

- [40] “Baterias com 800 km de autonomia”, disponível em: <http://www.veiculoselectricospt.com/baterias-com-800km-de-autonomia/>, acessado em 29 de abril de 2015.
- [41] “Supercapacitor”, disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>, acessado em 12 de março de 2015.
- [42] “Highly reversible physical charging and discharging mechanism”, Disponível em: <http://www.nesscap.com/product/how.jsp>, acessado em 12 de março de 2015.
- [43] “Lithium - sulfur battery”, disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium%E2%80%93sulfur_battery, acessado em 14 de março de 2015.
- [44] Brian Dodson; “New Lithium/Sulfur battery doubles energy density of lithium-ion”, disponível em: <http://www.gizmag.com/lithium-sulfur-battery-energy-density/29907/>, acessado em 14 de março de 2015.
- [45] Bill Moore; “Creating the Impossible Dream Electric Car Battery”, disponível em: <http://evworld.com/focus.cfm?cid=271>, acessado em 21 de abril de 2015.
- [46] “Elithion - Install single small cylindrical cell board”, Disponível em: http://lithiumate.elithion.com/php/install_cell_board_small_cyl_single.php, acessado em 2 de junho de 2015.
- [47] “Electropaedia - Battery Management System (BMS)”, Disponível em: <http://www.mpoweruk.com/bms.htm>, acessado em 20 de abril de 2015.
- [48] “Elithion - Functional description”, Disponível em: http://lithiumate.elithion.com/php/functional_descr.php, acessado em 2 de junho de 2015.
- [49] “Passive and Active Cell Balance Techniques for Applications with Lithium Ion Battery”, Fairchild Semiconductor, outubro de 2013.
- [50] Ali Pearlman; “Car differential”, disponível em: <http://web.mit.edu/2.972/www/reports/differential/differential.html>, acessado em 12 de abril de 2015.
- [51] “REMY HVH410-075-DOM Electric Motor”, Remy Motors.
- [52] Zytec Automotive; “Zytec IDT 300-70 Integrated 70 kW Drivetrain”, disponível em: <http://www.zytecautomotive.co.uk/products/electric-engines/70kw-flexible/>, acessado em 19 de março de 2015.
- [53] UQM Technologies; “UQM Power Phase Select”, disponível em: <https://uqm.com/products/full-electric/prototype/passenger-vehicles/>, acessado em 2 de abril de 2015.
- [54] EV-WEST; “Curtis 1238-7601 HPEVS AC-50 Brushless AC Motor Kit - 96 Volt”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=8&products_id=83, acessado

REFERÊNCIAS

- em 20 de março de 2014.
- [55] EV-WEST; “EV Conversion Kits”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=40&products_id=251, acessado em 19 de março de 2015.
- [56] EV-WEST; “HPEVS Curtis 1238-7601 96 V 650 AMP Controller”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=1&products_id=103, acessado em 21 de março de 2015.
- [57] EV-WEST; “Curtis 1238-1239 controller mount”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=25&products_id=227, acessado em 21 de março de 2015.
- [58] EV-WEST; “Curtis 1238-1239 Chill Plate Liquid Cooling Kit”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=25&products_id=104, acessado em 23 de março de 2015.
- [59] EV-WEST; “Complete D5 Liquid Cooling Kit”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=155, acessado em 18 de junho de 2015.
- [60] EV-WEST; “Adjustable Temperature Fan & Pump Switch”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=154, acessado em 23 de março de 2015.
- [61] EV-WEST; “SSBC Vacuum Pump Kit - EV Brake Booster”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=345, acessado em 19 de junho de 2015.
- [62] “Sistema antibloqueio ABS - Funcionamento e Sistema elétrico”, disponível em: <http://www.noticiasdaoficinavw.com.br/v2/2013/02/sistema-antibloqueio-abs-funcionamento-e-sistema-eletrico/>, acessado em 20 de junho de 2015.
- [63] EV-WEST; “Brake pressure transducer for regen”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=331, acessado em 20 de junho de 2015.
- [64] EV-WEST; “Evnetics Billet Aluminum Throttle Potentiometer”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=180, acessado em 22 de junho de 2015.
- [65] EV-WEST; “DC-DC Converter 400 W 30 Amp Isolated 72-144 Volts”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=33&products_id=156, acessado em 24 de junho de 2015.
- [66] “18650 Panasonic 3400mAh NCR18650B Flat Top”, disponível em: <http://www.govapers.com/18650-Panasonic-3400mAh-NCR18650B>, acessado em 16 de agosto de 2015.

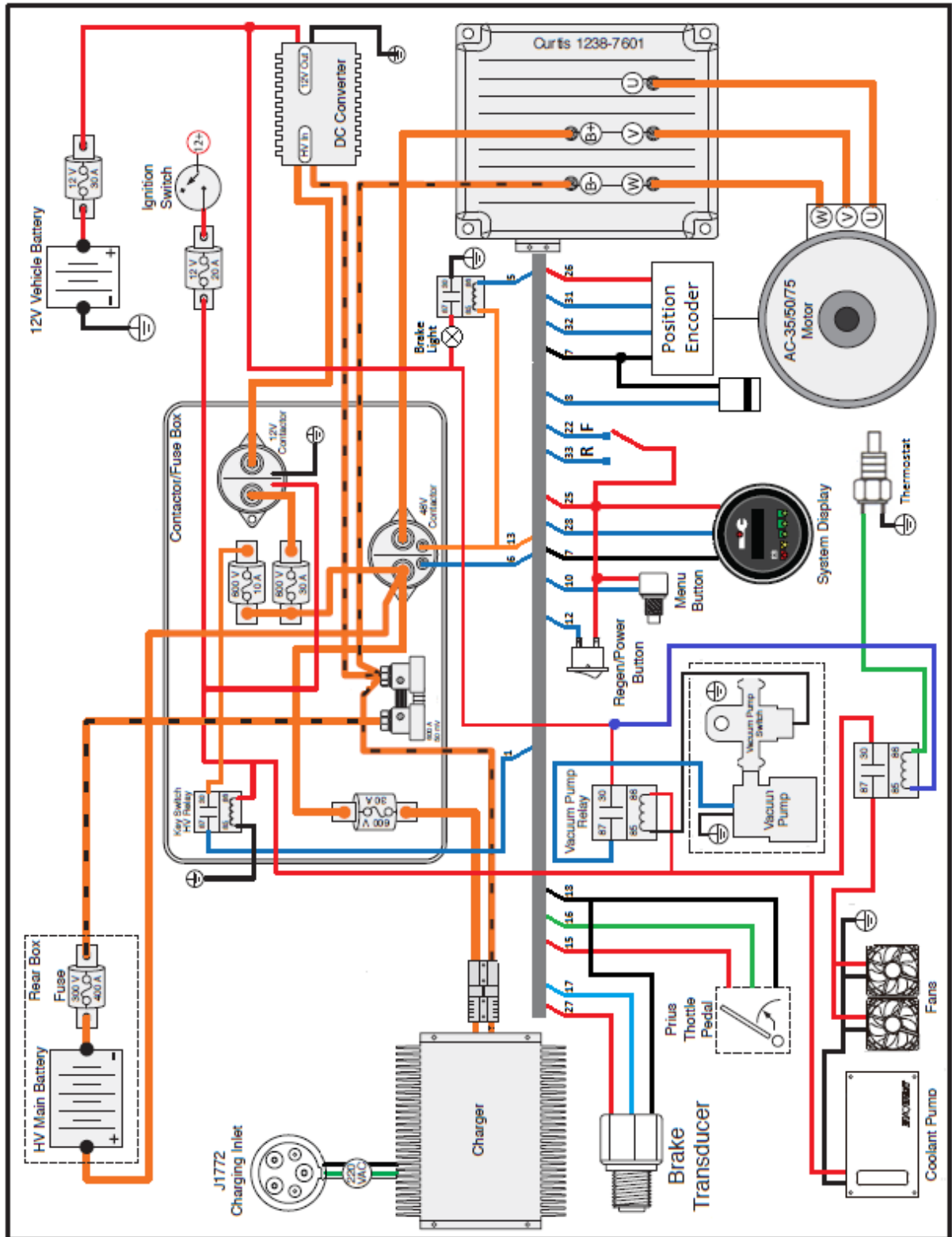
- [67] EV-WEST; “Elcon PFC2500 Cahrger”, disponível em: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=12&products_id=98, acessado em 12 de abril de 2015.
- [68] Battery Supports; “10 pc-battery spacer seperator 2x 18650 radiating battery holder”, disponível em: <http://www.batterysupports.com/10pc-battery-spacer-seperator-2x-18650-radiating-battery-holder-p-329.html>, acessado em 23 de abril de 2015.
- [69] Elithion; “Lithiumate - Professional distributed Li-ions BMS”, disponível em: http://elithion.com/lithiumate_pro.php, acessado em 4 de maio de 2015.
- [70] Elithion; “Lithiumate Overview”, disponível em: http://elithion.com/lithiumate_overview.php, acessado em 4 de maio de 2015.
- [71] Elithion; “Lithiumate Manual - Functional description”, disponível em: http://lithiumate.elithion.com/php/functional_descr.php, acessado em 20 de julho de 2015.
- [72] Elithion; “Install - single small cylindrical cell board”, disponível em: http://lithiumate.elithion.com/php/install_cell_board_small_cyl_single.php, acessado em 6 de maio de 2015.
- [73] Elithion; “Lithiumate Pro”, disponível em: http://elithion.com/lithiumate_pro_faq.php, acessado em 12 de maio de 2015.
- [74] Elithion; “Cell board, small cylindrical, single cell”, disponível em: <http://elithion.com/1SC0100X.php>, acessado em 8 de maio de 2015.
- [75] Elithion; “2CS0xxOK series current sensors”, disponível em: <http://elithion.com/2CS0xx0K.php>, acessado em 24 de julho de 2015.
- [76] Elithion; “Lithiumate current sensors”, disponível em: http://elithion.com/lithiumate_pro_current_sensors.php, acessado em 24 de julho de 2015.
- [77] Elithion; “6DS0020P - Multifunction display”, disponível em: <http://elithion.com/6DS0020P.php>, acessado em 27 de julho de 2015.
- [78] “Emission test cycles”, Disponível em: http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php, acessado em 6 de junho de 2015.
- [79] Romain Nicolas; “The different driving cycles”, Disponível em: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>, acessado em 6 de junho de 2015.
- [80] Sheldon S. Williamson; “Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles”, 1ª edição, ISBN 978-1-4614-7710-5, Springer, 2013.
- [81] “Road load determination of passanger cars”, Disponível em: <http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Road%20load%20determination%20of%20passenger%20cars%20-%20TNO-060-DTM-2012-02014.pdf>, acessado em 14 de junho de 2015.

REFERÊNCIAS

- [82] EDP SU; “Rotulagem de energia elétrica”, Disponível em: <http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Folhetos%20de%20Rotulagem/Rotulagem%20de%20energia%20el%C3%A9ctrica%20EDP%20SU%202014.pdf>, acedido em 11 de junho de 2015.

ANEXO 1

Esquema de montagem do *power drive* eléctrico do veículo.



ANEXO 2

Especificações técnicas da célula NCR 18650B.

Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

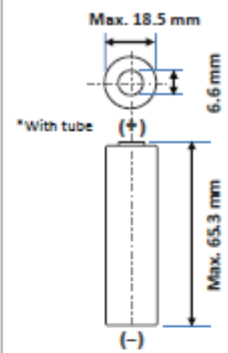
* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

Specifications

Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

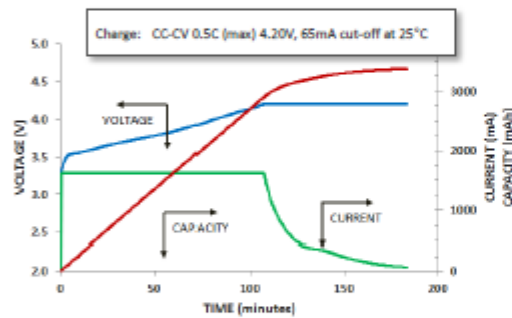
⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions

Dimensions

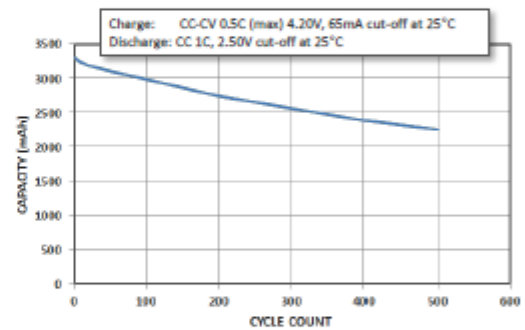


For Reference Only

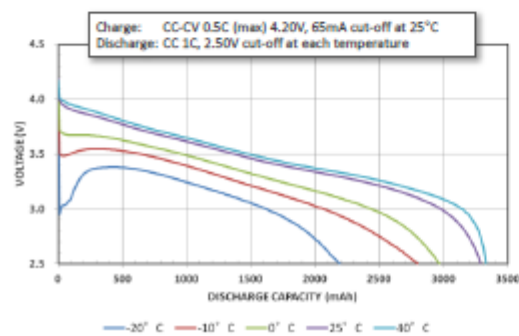
Charge Characteristics



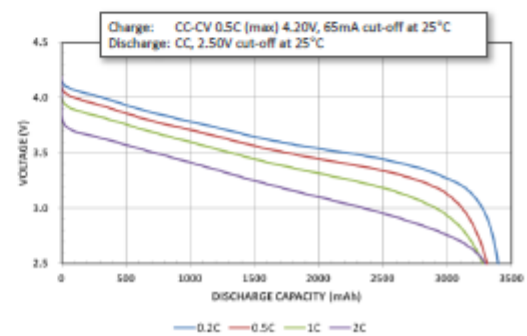
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)

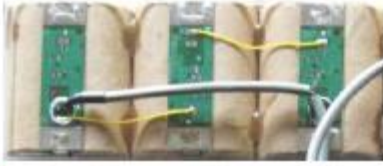


Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

Especificações técnicas do Lithiumate *Pro* BMS Master.



This off-the-shelf, sophisticated BMS will transform your Li-Ion or Lipo pack from a collection of cells to a true smart battery.

Description

Performs monitoring, evaluation, communication, balancing and protection of the battery.

Versatile:

- Compatible with most chargers, motor drivers
- Fully configurable, field programmable
- Supports all cell form factors
- Handles most Lithium chemistries
- CAN and RS232 communications

Safe:

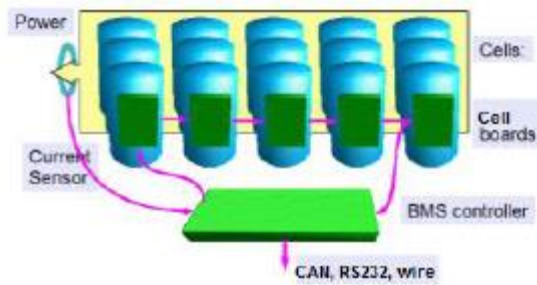
- Protects pack from over current
- Detects loss of isolation
- Distributed = few wires in HV pack

Easy to install:

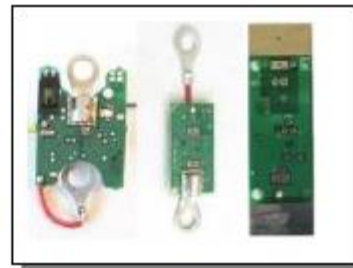
- Off the shelf components
- Single wire to adjacent cell boards

Life prolonging:

- Balances pack's SOC
- Protects pack from under/over voltage, charge and temperature



In its most basic form, the BMS consists of a BMS controller and a number of cell boards.



A wide array of cell boards is available to be mounted on cells of many form factors.

Specifications

Item	Value	Units
Controller		
Supply voltage	12	Vdc nom
12 V supply current	100	mAdc max
Control inputs' voltage	0 to 12	Vdc nom
Digital outputs' sink current	1.5	Adc max
Analog outputs' voltage	0 to 5	Vdc
RS232 rate	19200	baud
CAN rate	125, 250 or 500	kHz
Number of cells monitored	1 to 255	-
Operating temperature	-40 to +80	°C
Volume	0.8	liters
Current sensor		
Sensed battery current	5 to 600	Adc
Cell boards		
Cell voltage sensing range	2.09 to 4.54	Vdc
Cell voltage sensing accuracy	+/-10	mVdc
Cellboard temperature sensing accuracy	+/-2	°C
Cell current drain, standby	2.0	uA max
Cell current drain, operating	2	mA max
Cell current drain, balancing	200	mA nom
Battery isolation	2.5	kV

For complete details and specifications, please go to <http://lithiumate.com>

ANEXO 3

Código implementado em Matlab para simulação do comportamento dinâmico do veículo eléctrico.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%-----Variáveis de entrada-----%  
Cd=0.34;  
Af=1.993;  
fr=0.0062;  
m=1197+280;  
raio=0.298;  
n_trans=0.86;  
Gratio=5.3124;  
alfa=2;  
sin=sind(alfa);  
cos=cosd(alfa);  
  
tempo=250; %Tempo de simulação/leitura em segundos  
dT=0.1;    %Intervalo de tempo entre leituras em segundos  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%-----Velocidade-----%  
t=[0:dT:tempo];  
num_leituras=length(t);  
  
vel=zeros(1,num_leituras);  
for n=1:num_leituras-1  
    if vel(n)<=21.44  
        vel(n+1)=vel(n)+dT*((2402.87/m)-(0.057867*cos)-((13.08/m)*vel(n))-  
        ((0.387211/m)*(vel(n)^2))-(9.33*sin));  
    elseif (vel(n) > 21.44) && (vel(n) <= 35.25)  
        vel(n+1)=vel(n)+dT*((4035.73/m)-(0.057867*cos)-((89.24/m)*vel(n))-  
        ((0.387211/m)*(vel(n)^2))-(9.33*sin));  
    elseif (vel(n) > 35.25) %&& (vel(n) <= 46.99)  
        vel(n+1)=vel(n)+dT*((2226.65/m)-(0.057867*cos)-((37.90/m)*vel(n))-  
        ((0.387211/m)*(vel(n)^2))-(9.33*sin));  
    end;  
end;  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%-----Máxima RPM-----%  
vel_rpm=[];  
for n=1:length(vel)  
    vel_rpm=[vel_rpm (vel(n)*60*Gratio)/(2*pi*raio)];  
end;  
  
rpm=[];  
for n=1:length(vel_rpm)  
    if vel_rpm(n)<=8000  
        rpm=[rpm vel_rpm(n)];  
    elseif vel_rpm(n)>8000  
        rpm=[rpm 8000];  
    end;  
end;
```

```

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Correção da velocidade (RPM>8000) -----%
if max(rpm)==8000
    k=find(rpm==8000,1,'first');
    for n=1:length(vel_rpm)
        if vel_rpm(n)<=8000
            vel(:,1:n);
        elseif vel_rpm(n)>8000
            vel(n)=vel(k);
        end;
    end;
end;
vel_kmh=vel.*3.6; %Conversão da velocidade de m/s para km/h

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Aceleração e Distancia-----%
dist=[0];
for k=1:length(vel)-1
    dist=[dist dist(k)+(vel(k+1)*dT)];
end;

acel=[];
for k=1:length(vel)-1
    acel=[acel (vel(k+1)-vel(k))/dT];
end;
a=[NaN acel];

[aw,p9,p10] = plotyy(t,vel_kmh,t,a,'plot','plot');
ylabel(aw(1),'Velocidade (km/h)')
ylabel(aw(2),'Aceleração (m/s^2)')
xlabel('Tempo(segundos)')
p9.LineWidth = 2;grid(aw(1),'on');
p10.LineWidth = 2;grid(aw(2),'on');
title('Performance do veículo à máxima potência');
figure
mdist=max(dist)+150;plot(t,dist); axis([0 tempo 0 mdist]); grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Distancia percorrida (m)');
title('Performance do veículo à máxima potência');
figure
mrpm=max(rpm)+1000;plot(t,rpm); axis([0 tempo 0 mrpm]);grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Velocidade do motor (rpm)');
title('Performance do veículo à máxima potência');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Curva de Binário-----%
B=[];
for n=1:length(vel)
    if vel(n)<=21.44
        B(n)=164.58-0.89552*vel(n);
    elseif (vel(n) > 21.44) && (vel(n) <= 35.25)
        B(n)=276.42-6.112050*vel(n);
    elseif (vel(n) > 35.25) && (vel(n) <= 46.99)
        B(n)=152.51-2.596191*vel(n) ;
    end;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ANEXO 3

```

%-----Potências-----%
Pmotor_out=[];
for n=1:length(vel)
    Pmotor_out=[Pmotor_out (B(n)*rpm(n))/9549];
end;

figure
[ay,p3,p4] = plotyy(rpm,B,rpm,Pmotor_out,'plot','plot');
ylabel(ay(1),'Binário motor (Nm)')
ylabel(ay(2),'Potência do motor (kW)')
xlabel('Velocidade do motor (rpm)')
p3.LineWidth = 2;grid(ay(1),'on');
p4.LineWidth = 2;grid(ay(2),'on');
title('Performance do veículo à máxima potência');
figure
[ab,p7,p8] = plotyy(vel_kmh,B,vel_kmh,Pmotor_out,'plot','plot');
ylabel(ab(1),'Binário motor (Nm)')
ylabel(ab(2),'Potência do motor (kW)')
xlabel('Velocidade (km/h)')
p7.LineWidth = 2;grid(ab(1),'on');
p8.LineWidth = 2;grid(ab(2),'on');
title('Performance do veículo à máxima potência');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Forças-----%
Fmotora=[];
for n=1:length(vel)
    %Fmotora=[Fmotora (bin(n)*ntrans*Gratio)/raio];
    Fmotora=[Fmotora (Pmotor_out(n)*1000*n_trans)/vel(n)];
end;
Futil=[];
for n=1:length(vel)
    Futil(n)=m*a(n);
end;
Ft=[];
for n=1:length(vel)
    Ft(n)=Fmotora(n)-Futil(n);
end;

figure
mfm=max(Fmotora)+150;plot(t,Fmotora,t,Futil,t,Ft); axis([0 tempo 0 mfm]);
grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Força (N)');
title('Performance do veículo à máxima potência'); legend('Força
motora','Força propulsão ou útil','Força atrito total')
figure
mvel=max(vel_kmh)+5;mfm=max(Fmotora)+150;plot(vel_kmh,Fmotora,vel_kmh,Futil
,vel_kmh,Ft); axis([0 mvel 0 mfm]); grid on;
xlabel('Velocidade (km/h)'); ylabel('Força (N)');
title('Performance do veículo à máxima potência'); legend('Força
motora','Força propulsão ou útil','Força atrito total')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Variáveis de saída-----%
t_excel=t';
dist_excel=dist';
vel_kmh_excel=vel_kmh';
a_excel=a';
rpm_excel=rpm';

```

```

B_excel=B';
Pmotor_out_excel=Pmotor_out';
Fmotora_excel=Fmotora';
Futil_excel=Futil';
Ft_excel=Ft';

```

Código implementado em Matlab para simulação do ciclo NEDC.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Variáveis de entrada-----%
Cd=0.34;
Af=1.993;
fr=0.0062;
m=1127+145;
raio=0.298;
Gratio=5.3124;
alfa=0;
sin=sind(alfa);
cos=cosd(alfa);
n_trans=0.86;
n_motor=0.88;
n_control=0.88;
n_carreg=0.92;
n_bateria=0.9;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----NEDC = 4xECE+EUDC-----%
tempo=1180; %Tempo de simulação/leitura em segundos
dT=1; %Intervalo de tempo entre leituras em segundos
t=[0:dT:tempo];
num_leituras=length(t);

vel=zeros(1,1181);%vel=zeros(1,num_leituras);
for n=1:12
    vel(n)=0;
end;
for n=13:16 %Acelera até 15km/h em 4s.
    vel(n)=(3.75*(n-1))-41.25;
end;
for n=17:24 %Velocidade constante de 15km/h durante 8s.
    vel(n)=15;
end;
for n=25:29 %Desacelera até 0km/h em 5s.
    vel(n)=(-3*(n-1))+84;
end;
for n=30:50
    vel(n)=0;
end;
for n=51:62 %Acelera até 32km/h em 12s.
    vel(n)=(2.6667*(n-1))-130.66;
end;
for n=63:86 %Velocidade constante de 32km/h durante 24s.
    vel(n)=32;
end;
for n=87:97 %Desacelera até 0km/h em 11s.
    vel(n)=(-2.909*(n-1))+279.264;
end;

```

ANEXO 3

```
for n=98:118
    vel(n)=0;
end;
for n=119:144 %Acelera até 50km/h em 26s.
    vel(n)=(1.92307*(n-1))-224.9991;
end
for n=145:156 %Velocidade constante de 50km/h durante 12s.
    vel(n)=50;
end;
for n=157:164 %Desacelera até 35km/h em 8s.
    vel(n)=(-1.875*(n-1))+340.625;
end;
for n=165:177 %Velocidade constante de 35km/h durante 13s.
    vel(n)=35;
end;
for n=178:189 %Desacelera até 0km/h em 12s.
    vel(n)=(-2.91667*(n-1))+548.33396;
end;
for n=190:196
    vel(n)=0;
end;

for n=1:196
    vel(195+n)=vel(n);
    vel(390+n)=vel(n);
    vel(585+n)=vel(n);
end; % Ciclo 4xECE termina em 780s (elemento 781)

for n=782:801
    vel(n)=0;
end;
for n=802:842 %Acelera até 70km/h em 41s.
    vel(n)=(1.70731*(n-1))-1365.848;
end;
for n=843:892 %Velocidade constante de 70km/h durante 50s.
    vel(n)=70;
end;
for n=893:900 %Desacelera até 50km/h em 8s.
    vel(n)=(-2.5*(n-1))+2297.5;
end;
for n=901:969 %Velocidade constante de 50km/h durante 69s.
    vel(n)=50;
end;
for n=970:982 %Acelera até 70km/h em 13s.
    vel(n)=(1.53846*(n-1))-1439.2292;
end;
for n=983:1032 %Velocidade constante de 70km/h durante 50s.
    vel(n)=70;
end;
for n=1033:1067 %Acelera até 100km/h em 35s.
    vel(n)=(0.85714*(n-1))-813.7112;
end;
for n=1068:1097 %Velocidade constante de 100km/h durante 30s.
    vel(n)=100;
end;
for n=1098:1117 %Acelera até 120km/h em 20s.
    vel(n)=(n-1)-996;
end;
for n=1118:1127 %Velocidade constante de 120km/h durante 10s.
    vel(n)=120;
```

```

end;
for n=1128:1161 %Desacelera até 0km/h em 34s.
    vel(n)=(-3.52941*(n-1))+4094.1156;
end;
for n=1162:1181
    vel(n)=0;
end;
vel_ms=vel./3.6; %Conversão da velocidade de km/h para m/s

plot(t,vel); axis([0 1200 0 120]);grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Velocidade (km/h)');
title('European Driving Cycle');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Aceleração--Distancia-----%
dist=[0];
for n=1:length(vel)-1
    dist=[dist dist(n)+(vel_ms(n+1)*dT)];
end;
acel=[];
for k=1:length(vel)-1
    acel=[acel (vel_ms(k+1)-vel_ms(k))/dT];
end;
a=[NaN acel];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Força resistente total-----%
Ft=[];
for n=1:length(vel)
    if vel(n)~=0

Ft(n)=((m*9.8*fr*cos)+(0.5*1.2*Af*Cd*(vel_ms(n)^2)+(m*9.8*sin)+(m*1.05*a(n)
)));
        elseif vel(n)==0
            Ft(n)=0;
        end;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Potências-----%
Pt=[];
for n=1:length(vel) %Potência nas rodas em kW
    Pt(n)=(Ft(n)*vel_ms(n))/1000;
end;
figure
subplot(2,1,1);plot(t,Ft); axis([0 1200 -2000 2000]); grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Força de atrito total (N)');
subplot(2,1,2);plot(t,Pt); axis([0 1200 -50 50]); grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Potência nas rodas (kW)');

Pmotor_out=[]; %Potência à saída do motor em kW
for n=1:length(vel)
    if Pt(n)<0
        Pmotor_out(n)=Pt(n)*n_trans;
    elseif Pt(n)>=0
        Pmotor_out(n)=Pt(n)/n_trans;
    end;
end;
end;

```

ANEXO 3

```

Pmotor_in=[]; %Potência à entrada do conjunto motor e do controlador em
kW
for n=1:length(vel)
    if Pmotor_out(n)<0
        Pmotor_in(n)=Pmotor_out(n)*(n_motor*n_control);
    elseif Pmotor_out(n)>=0
        Pmotor_in(n)=Pmotor_out(n)/(n_motor*n_control);
    end;
end;
Pbateria_in=[]; %Potência à entrada do conjunto carregador e bateria em kW
for n=1:length(vel)
    if Pmotor_in(n)<0
        Pbateria_in(n)=0;
    elseif Pmotor_in(n)>=0
        Pbateria_in(n)=Pmotor_in(n)/(n_carreg*n_bateria);
    end;
end;
Pabs=[]; %Potência absorvida ou de regeneração do veículo
for n=1:length(vel)
    if Pmotor_in(n)<0
        Pabs(n)=Pmotor_in(n);
    elseif Pmotor_in(n)>=0
        Pabs(n)=Pbateria_in(n);
    end;
end;
figure
plot(t,Pt,t,Pmotor_out,t,Pmotor_in,t,Pabs); axis([0 1200 -50 70]);grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Potência (kW)');
title('European Driving Cycle'); legend('Potências nas rodas','Potência
entregue às rodas','Potência entregue ao motor','Potência absorvida pelo
veículo')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Energia consumida-----%
Econs=[];
for n=1:length(vel) %Energia consumida em kWh
    Econs(n)=Pabs(n)*(1/3600);
end;

Etotal=[0];
for n=1:length(vel)-1 %Energia total consumida em kWh
    Etotal(n+1)=Etotal(n)+Econs(n+1);
end;
figure
subplot(2,1,1);plot(t,Econs); axis([0 1200 -0.005 0.02]); grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Energia consumida(kWh)');
subplot(2,1,2);plot(t,Etotal); axis([0 1200 -0.005 2.4]); grid on;
xlabel('Tempo (segundos)'); ylabel('Energia consumida acumulada (kWh)');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----Variáveis de saída-----%
t_excel=t';
vel_excel=vel';
dist_excel=dist';
a_excel=a';
Ft_excel=Ft';
Pt_excel=Pt';
Pmotor_out_excel=Pmotor_out';
Pmotor_in_excel=Pmotor_in';

```

```
Pbateria_in_excel=Pbateria_in';  
Pabs_excel=Pabs';  
Econs_excel=Econs';  
Etotal_excel=Etotal';
```