

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Sistema de Alimentação de um VEC (Veículo
Eléctrico de Competição)**

Tiago Alberto Correia da Rocha

ESTADO DA ARTE

Relatório Final realizada no âmbito da Unidade Curricular PDI do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. Armando Luís Sousa Araújo

Fevereiro de 2011

Página em branco

Índice

Índice	iv
Lista de figuras	v
Lista de tabelas	vii
Capítulo 1	9
Introdução	9
1.1 - Enquadramento do projecto	9
1.2 - Apresentação do projecto VEC (Veículo Eléctrico de Competição)	9
1.3 - Objectivos	11
1.4 - Plano de trabalho	12
Capítulo 2	13
Estado da Arte.....	13
2.1 - Veículo automóvel de propulsão eléctrica	13
2.2 - Sistemas de alimentação de veículos eléctricos.....	15
2.2.1 - Introdução	15
2.2.2 - Baterias	17
2.2.3 - Tipo de baterias	19
2.2.4 - Modelo da bateria	25
2.2.5 - Ultra-condensadores.....	27
2.2.6 - Topologia híbrida de armazenamento	32
2.3 - Sistemas de carga de baterias	35
2.3.1 - Métodos de carga.....	35
2.3.2 - Topologias de conversão	37
Referências	37

Lista de figuras

Figura 1.1 - Diagrama do Projecto do Veículo Eléctrico de Competição	10
Figura 1.2 - Diagrama da Sub-Equipa - Conversão do Veículo	10
Figura 1.3 - Diagrama de blocos do Sistema de Conversão.....	11
Figura 2.1 - Esquema simplificado de um EV alimentado a baterias (BEV).....	15
Figura 2.2 - Características dos vários sistemas de armazenamento de energia [1].	17
Figura 2.3 - Curva típica da tensão de uma bateria a descarregar [4].	18
Figura 2.4 - Características de uma bateria em termos de: energia extraída segundo (a) o número de ciclos, (b) temperatura, (c) corrente, e (d) tempo de armazenamento (auto-descarga); (e) tensão de circuito aberto segundo o SOC; (f) resposta transitória impondo um degrau de corrente [6].	19
Figura 2.5 - Custo das células de Ni-MH e Li-ion em função da produção em volume de veículos [5].	22
Figura 2.6 - Diferentes eléctrodos para diferentes tecnologias de iões de lítio, e suas características [9].	23
Figura 2.7 - Comparação de atributos de vários tipos de baterias e ultra-condensadores [5].	24
Figura 2.8 - Modelo eléctrico (a) Thevenin, (b) de impedância, e (c) runtime [6].	26
Figura 2.9 - Alteração da tensão de circuito aberto normalizada (V_{oc}/V_{max}) para vários tipos de baterias e o UC [5].	28
Figura 2.10 - Circuito equivalente de um UC [4].	30
Figura 2.11 - Modelo RC de malha paralela [17].	31
Figura 2.12 - Modelo RC de linha de transmissão [17].	32
Figura 2.13 - Modelo RC de malhas séries paralelas [17].	32
Figura 2.14 - Modelo geral RC ramos paralelos [17].	32
Figura 2.15 - Comparação dos parâmetros das tecnologias de armazenamento de energia [5].	33
Figura 2.16 - Configuração passiva paralela [19].	33

Figura 2.17 - Configuração ultra-condensador/bateria [20].	34
Figura 2.18 - Diagrama de configuração bateria/ultra-condensador [20].	34
Figura 2.19 - Configuração em cascata [20].	34
Figura 2.20 - Configuração de múltiplos conversores [20]	35
Figura 2.21 - Configuração de um conversor de múltiplas entradas [20].	35

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características dos BEV, HEV e FCEV[1]	14
Tabela 2.2 - Comparação das diferentes tecnologias de baterias [7]	19
Tabela 2.3 - Critérios de performance do DOE para um EV (curto prazo) [8].	20
Tabela 2.4 - Características das células de UCs de vários fabricantes [14].	29
Tabela 2.5 - Comparação das diferentes tecnologias de armazenamento com o EESU [16].	30

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento do projecto

Nos dias que correm, existe uma mentalidade de redução dos índices de poluição a nível mundial. Perante este desafio, devem-se procurar as causas para os efeitos da poluição, na tentativa de chegar a uma solução coerente. Outro facto é a escassez dos combustíveis fósseis, a principal fonte de energia do planeta.

As grandes fontes de emissão de gases de estufa advêm dos sectores dos transportes e produção de energia eléctrica. A nível da geração de energia a solução, que está em larga escala de implementação, é o uso de energias renováveis, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis. Já no sector da mobilidade a solução é a introdução de veículos eléctricos no mercado.

A concepção de veículos eléctricos coloca vários desafios à engenharia, sendo o armazenamento de energia o grande obstáculo à comercialização dos veículos eléctricos.

1.2 - Apresentação do projecto VEC (Veículo Eléctrico de Competição)

O Projecto do Veículo Eléctrico de Competição ([VEC](#)) consiste na conversão de um veículo urbano convencional, num veículo de competição com tracção totalmente eléctrica.

O desenvolvimento de um veículo eléctrico obriga a que sejam reunidos conteúdos teóricos de diversas áreas de engenharia, desde a engenharia mecânica/automóvel, que influencia directamente a aerodinâmica e a transmissão do veículo, passando pela engenharia electrotécnica, cada vez mais influente e decisiva no desenvolvimento do motor eléctrico e na electrónica de potência, até à engenharia química associada à problemática das baterias.

A equipa de concepção deste projecto apenas contém três elementos de electrotecnia e um elemento de mecânica. Foi necessário dividir a equipa em sub-equipas, donde se destaca a sub-equipa de mecânica que é responsável pela preparação/projecto do veículo e a sub-

equipa de electrotécnia (ou de conversão do veículo) que é responsável pelo sistema de tracção, sistema de alimentação e pelo sistema de sensorização e telemetria, Figura 1.1.

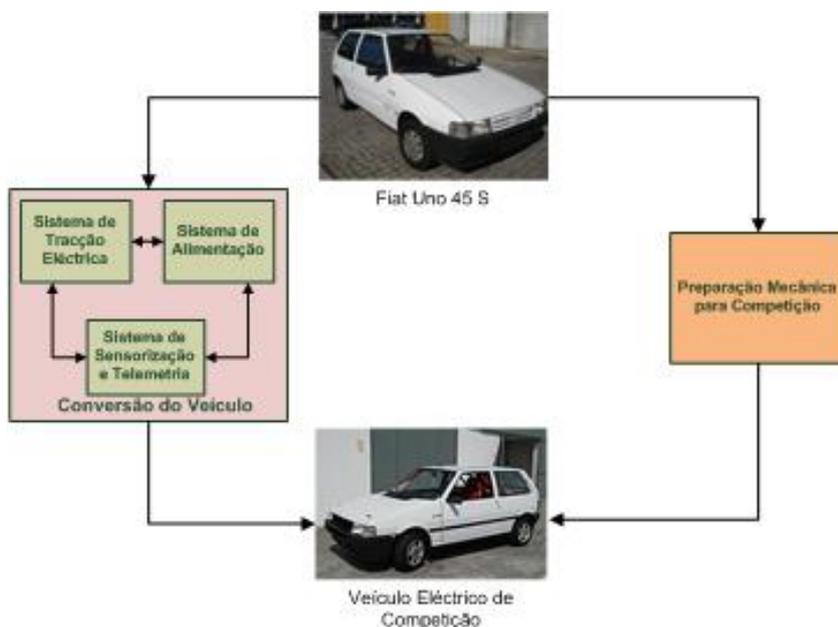


Figura 1.1 - Diagrama do Projecto do Veículo Eléctrico de Competição

Na Figura 1.2 é possível verificar a distribuição da sub-equipa encarregue da conversão do veículo. A conversão do veículo será realizada por três elementos, um encarregue do sistema de tracção, outro do sistema de alimentação e gestão de energia e outro responsável pela sensorização e telemetria do veículo. Visto ser necessário posteriormente interligar todos os sistemas, é imprescindível garantir uma coordenação efectiva dentro desta sub-equipa.

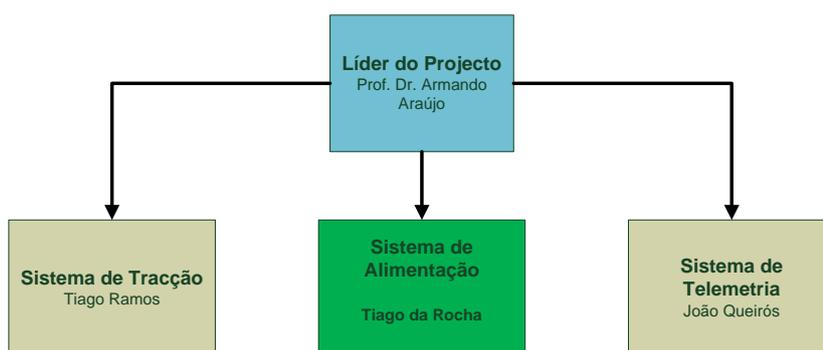


Figura 1.2 - Diagrama da Sub-Equipa - Conversão do Veículo

O sistema de conversão do veículo terá por base o diagrama de blocos apresentado na Figura 1.3, sendo possível verificar a necessidade de interligação dos vários subsistemas.

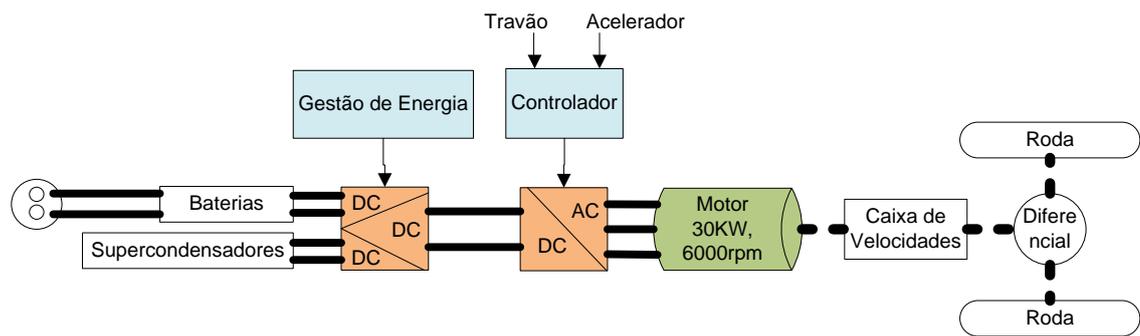


Figura 1.3 - Diagrama de blocos do Sistema de Conversão

1.3 - Objectivos

Pretende-se com esta dissertação desenvolver um sistema de alimentação para um Veículo Eléctrico com o intuito de poder participar em provas de competição automóvel. É possível identificar vários objectivos, donde se destacam a parte do armazenamento e gestão de energia, bem como do processo de carregamento das baterias.

Estando perante um projecto de um veículo de competição é relevante ter em atenção a performance do veículo. Assim sendo, uma das razões que altera substancialmente o rendimento do veículo é o seu peso. Sabendo da relação energia-peso das baterias, torna-se necessário efectuar uma quantificação da energia necessária para uma prova, de forma a ajustar o número de baterias a introduzir no veículo.

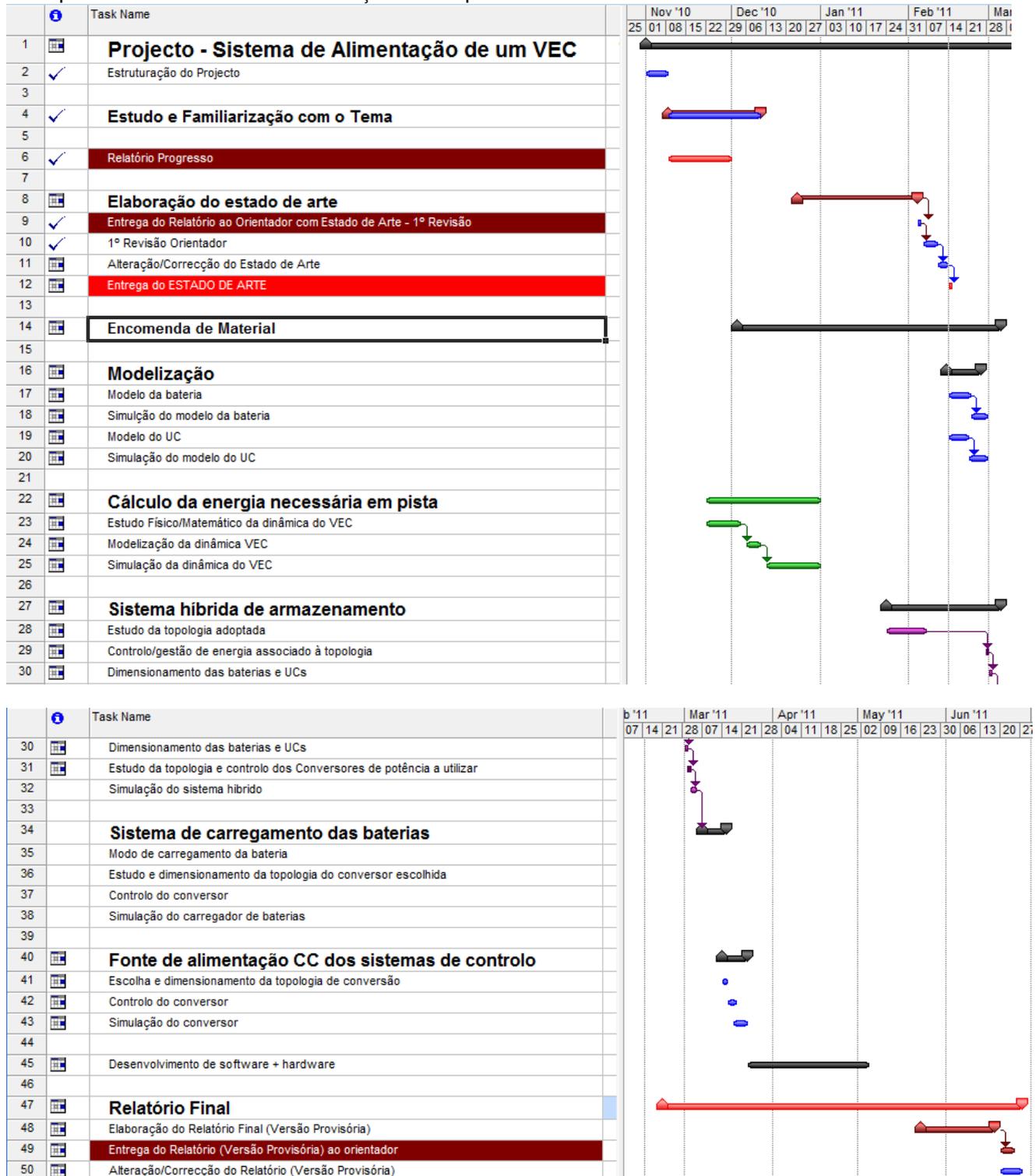
A interligação do sistema de armazenamento, do qual se inclui as baterias e os super condensadores, com o sistema de propulsão/tracção necessita de uma adaptação de tensões e regulação do fluxo energético. Para isso é necessário escolher uma topologia de conversão, que permita regular o trânsito de energia de forma bidireccional pois tem de ser capaz de suportar a frenagem regenerativa oriunda do motor.

Para validar o sistema de armazenamento de energia recorrer-se a ferramentas de simulação. É necessário, por conseguinte, modelar os componentes de todo o sistema, destacando as baterias e ultracondensadores.

Outro objectivo é o desenvolvimento de um carregador, necessário para reabastecer as baterias. Procura-se identificar a melhor estratégia de carregamento, definir a topologia do conversor e o seu controlo.

1.4 - Plano de trabalho

O plano de trabalho desta dissertação está representado abaixo.



Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 - Veículo automóvel de propulsão eléctrica

O veículo eléctrico (VE), ou do inglês *electric vehicle* (EV), foi inventado em 1834 por Thomas Davenport, e é um veículo no qual envolve propulsão eléctrica.

Existiam, na altura, grandes limitações associadas às baterias, já que não eram capazes de receber carga. Esta limitação foi ultrapassada anos mais tarde quando, em 1859 Gaston Plante inventou a bateria de ácido chumbo, capaz de ser recarregada pela rede de distribuição. Outras descobertas foram feitas no campo das baterias, nos fins desse século, gerando uma proliferação na produção de veículos eléctricos por companhias nos Estados Unidos da América, França e Inglaterra. No início do século XX grande parte dos veículos, que circulavam nas estradas de Nova Iorque, eram eléctricos.

Apesar da evolução do EV, o veículo de motor de combustão interna a gasolina sofreu também grandes desenvolvimentos, incluindo a adição de um motor eléctrico para o arranque do motor de combustão, entre outros melhoramentos. Este veículo começou a ter melhores características face ao EV, nomeadamente a sua velocidade e sobretudo a maior autonomia.

Em 1908, Henry Ford revolucionou a indústria automóvel com a produção em série do modelo T com motor de combustão. O fabrico deste veículo numa linha de montagem diminuía em muito o tempo de produção, bem como o seu preço, fazendo deste um automóvel barato e de qualidade. O EV foi rapidamente posto de parte pelos fabricantes de veículos e em 1930 acabou por desaparecer.

No início dos anos 70, alguns países, movidos pelas crises energéticas e a questão do aquecimento global, resolveram começar a estudar a viabilidade dos carros eléctricos. Houve, desde então, um crescimento no desenvolvimento dos elementos que constituem o veículo eléctrico, salientando os sistemas de armazenamento de energia, controladores electrónicos, conversores de potência, e motores eléctricos.

Os EVs podem ser distinguíveis em três classes: veículo eléctrico a bateria (*battery electric vehicle - BEV*), veículo eléctrico híbrido (*hybrid electric vehicle - HEV*), e veículo eléctrico a células de combustível (*fuel-cell electric vehicle - FCEV*). Na Tabela 2.1 estão representadas comparações das maiores características dos EVs.

Tabela 2.1 - Características dos BEV, HEV e FCEV[1]

Types of EVs	Battery EVs	Hybrid EVs	Fuel Cell EVs
Propulsion	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives 	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives • Internal combustion engines 	<ul style="list-style-type: none"> • Electric motor drives
Energy system	<ul style="list-style-type: none"> • Battery • Ultracapacitor 	<ul style="list-style-type: none"> • Battery • Ultracapacitor • ICE generating unit 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel cells • Need battery / ultracapacitor to enhance power density for starting.
Energy source & infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • Electric grid charging facilities 	<ul style="list-style-type: none"> • Gasoline stations • Electric grid charging facilities (for Plug In Hybrid) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogen • Hydrogen production and transportation infrastructure
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Zero emission • High energy efficiency • Independence on crude oils • Relatively short range • High initial cost • Commercially available 	<ul style="list-style-type: none"> • Very low emission • Higher fuel economy as compared with ICE vehicles • Long driving range • Dependence on crude oil (for non Plug In Hybrid) • Higher cost as compared with ICE vehicles • The increase in fuel economy and reduce in emission depending on the power level of motor and battery as well as driving cycle. • Commercially available 	<ul style="list-style-type: none"> • Zero emission or ultra low emission • High energy efficiency • Independence on crude oil (if not using gasoline to produce hydrogen) • Satisfied driving range • High cost • Under development
Major issues	<ul style="list-style-type: none"> • Battery and battery management • Charging facilities • Cost 	<ul style="list-style-type: none"> • Multiple energy sources control, optimization and management. • Battery sizing and management 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel cell cost, cycle life and reliability • Hydrogen infrastructure

De facto, a principal limitação na utilização do BEV é a baixa autonomia aliada à não existência de infra-estruturas para recarregar ou trocar as baterias. Hoje em dia, os BEVs são usados principalmente em pequenos carros e para percorrer pequenas distâncias.

Outros tipos de veículos têm vindo a ser desenvolvidos, destacando os híbridos (HEV). Estes funcionam com um motor de combustão interna combinado com baterias ou outros sistemas de armazenamento de energia eléctrica ou de conversão eléctrica e um ou mais motores eléctricos, tornando-os assim mais eficientes e menos poluentes. Foram já comercializados alguns destes HEVs, nomeadamente o Honda Insight e o Toyota Prius.

Actualmente a grande valorização do petróleo e seus derivados, bem como a preocupação da poluição ambiental, tem levado à criação e produção em série por parte de grandes fabricantes automóveis, dos veículos totalmente eléctricos, que não fazem qualquer tipo de emissão de gases (*ZEV - zero emission vehicle*). São exemplo disso a Mitsubishi e a Nissan que têm já no mercado os modelos IMiev e LEAF respectivamente. Muitas outras empresas têm já protótipos de EVs que estão a ser ou serão brevemente produzidos.

Como objectivo desta dissertação, pretende-se focar nas tecnologias inerentes aos veículos eléctricos a baterias, pelo que serão deixados de fora as outras classes de EVs.

Um veículo eléctrico alimentado a baterias (BEV) tem por base uma estrutura simples que está apresentada na Figura 2.1. As baterias estão ligadas a um conversor de electrónica de potência que controla a potência entregue ao motor de tracção. Existem no entanto variantes a este esquema, como por exemplo o uso de mais que uma forma de armazenamento de energia, ou o uso de mais do que um motor eléctrico. Diferentes tipos de motor podem ser usados, tais como, motores de corrente contínua, de indução e síncronos.

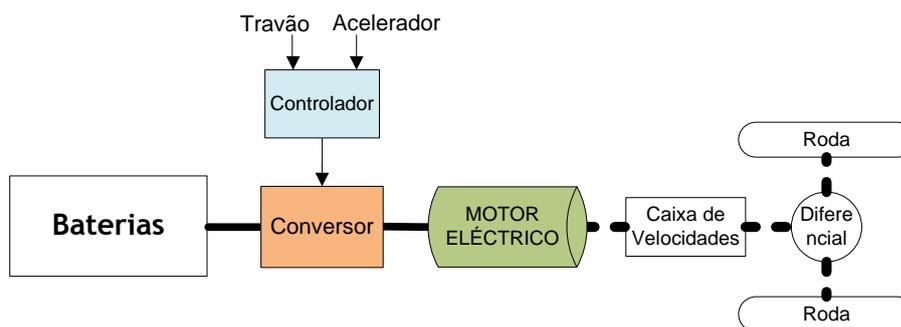


Figura 2.1 - Esquema simplificado de um EV alimentado a baterias (BEV)

Os veículos eléctricos, devido a terem presente uma tracção eléctrica e utilizarem armazenamento de energia com capacidade de bidirecionalidade de potência, têm grande eficiência energética, já que são capazes de regenerar energia aquando da travagem ou durante as descidas.

2.2 - Sistemas de alimentação de veículos eléctricos

2.2.1 - Introdução

O armazenamento de energia é uma peça fundamental num EV, sendo alvo de um enorme estudo no sentido de superar obstáculos que, nos tempos que correm, se prendem com a autonomia (energia específica), potência específica, eficiência, necessidade de manutenção, custo, impacto ambiental (reciclável) e segurança. Existem diferentes tipos de sistemas de armazenamento de energia (energy storage system - ESS) tais como baterias, ultra-condensadores (UC), células de combustível (*fuel-cell* - FC) e volantes de inércia (do inglês flywheels).

Alguns termos são usados para caracterizar os sistemas de armazenamento, determinando que sistema deverá ser usado para uma aplicação particular. De seguida está uma breve descrição destas características[2].

Energia específica - é um factor importante na determinação da autonomia, e caracteriza-se como sendo a quantidade de energia total que o ESS consegue armazenar por quilograma de massa (em Wh/kg).

Densidade de energia - semelhante ao termo anterior, mas relativo ao volume, ou seja, a quantidade de energia em watt-hora (Wh) que o sistema consegue fornecer por litro do seu volume. Quanto maior o valor desta característica, mais pequeno é o seu tamanho.

Potência específica e densidade de potência - é um factor importante relacionado com a aceleração, e caracteriza-se como sendo o número de watt por quilograma que o sistema de armazenamento consegue fornecer. Numa bateria a potência específica é normalmente medida a 80% do estado de carga. A densidade potência relaciona a potência com o volume e é expresso em watt por litro (W/l).

Ciclo de vida - é o número de vezes que o ESS pode ser descarregado e carregado durante a sua vida. O ciclo de vida de uma bateria é considerado terminado quando não consegue carregar acima dos 80% do seu SOC.

Custo - é expresso em unidades de moeda por watt-hora.

As baterias são o sistema de armazenamento mais utilizado no mercado, dado o seu baixo preço, grande robustez e facilidade em transportar. A sua energia é acumulada na forma de energia química. O objectivo de ter baterias com uma densidade específica de energia, capaz de substituir os combustíveis fósseis a um preço aceitável, ainda não foi atingido.

Os ultra-condensadores armazenam energia por separação e acumulação física de cargas opostas. São fontes de elevada potência mas de baixa energia específica.

A célula de combustível é um dispositivo electroquímico que converte energia química directamente em energia eléctrica, de forma muito eficiente. FCs são semelhantes às baterias, no entanto os materiais activos não fazem parte integral do dispositivo, necessitando de ser alimentada sempre que acabar o combustível [3]. Tem alta energia específica mas sofre, no entanto, de várias desvantagens. Esta tecnologia encontra-se ainda numa fase de desenvolvimento devido ao grande problema que é o manuseamento do hidrogénio, e a sua produção é ainda bastante cara.

Um volante de inércia armazena energia cinética que pode depois ser transformada em energia eléctrica. Este tipo de ESS consiste num disco que roda, e num motor/gerador que está acoplado ao disco para fazer a conversão do tipo de energia. O flywheel consegue armazenar cerca de 4 quilowatt-hora de electricidade e produzir 25 cavalos de potência. Um veículo necessitará de várias unidades de flywheels para ser comparado em performance e alcance aos veículos de motor de combustão interna. Este sistema de armazenamento foi já implementado com sucesso, mas encontra-se ainda numa fase de desenvolvimento científico [2].

As características, em termos de energia e potência específica, que diferenciam estas formas de armazenamento estão apresentadas na Figura 2.2. É possível verificar a alta energia específica das baterias e células de combustível, e por outro lado a alta potência específica dos ultra-condensadores [1].

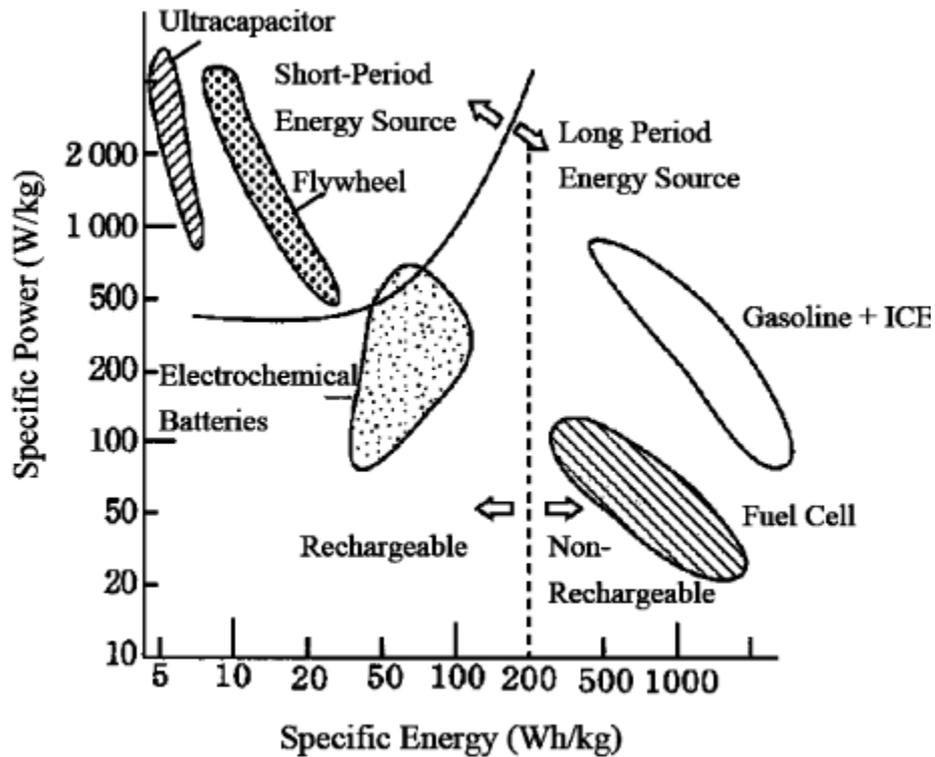


Figura 2.2 - Características dos vários sistemas de armazenamento de energia [1].

Ao combinar dois ou mais ESS com características complementares, um com elevada energia específica e outro com alta potência específica, pode ser construído um dispositivo com maior eficiência, anulando as desvantagens ao utilizar apenas um. No caso de se juntar as baterias aos UCs, a energia específica das baterias alia-se à potência específica dos UCs tornando um sistema de armazenamento híbrido de grande rendimento.

Em operações que requerem alta potência, com por exemplo acelerar ou subir, ambos os tipos de armazenamento de energia enviam a sua potência para a carga. Por outro lado, quando se está a movimentar um veículo a velocidade constante, ou seja, necessidade de enviar baixas potências, as baterias despacham a potência necessária e também carregam os UCs. Numa situação de travagem regenerativa, a potência de pico é absorvida pelos UCs e apenas uma parte é absorvida pelas baterias. Desta maneira, todo o sistema torna-se mais leve e pequeno do que a utilização de apenas um ESS [4].

2.2.2 - Baterias

A bateria é um dispositivo que converte energia química em energia eléctrica por meio de uma reacção electroquímica de oxidação-redução. No caso de se tratar de um sistema recarregável, a bateria é recarregada pelo processo reverso. Este tipo de reacção envolve a transferência de electrões de um material para outro por um circuito eléctrico [3].

Uma bateria é composta por várias células juntas. Cada célula consiste em dois eléctrodos (positivo e negativo), imersos num electrólito. Os dois eléctrodos são feitos de materiais diferentes porosos, reagindo, cada um deles, com o electrólito [5].

A capacidade de uma bateria é especificada normalmente em ampere-hora, que é definido como o número de ampere-hora em que a bateria é descarregada desde a sua capacidade máxima, até a tensão nos seus terminais descer abaixo da tensão designada de cut-off. A Figura 2.3 mostra a curva típica da tensão de uma bateria a descarregar [4].

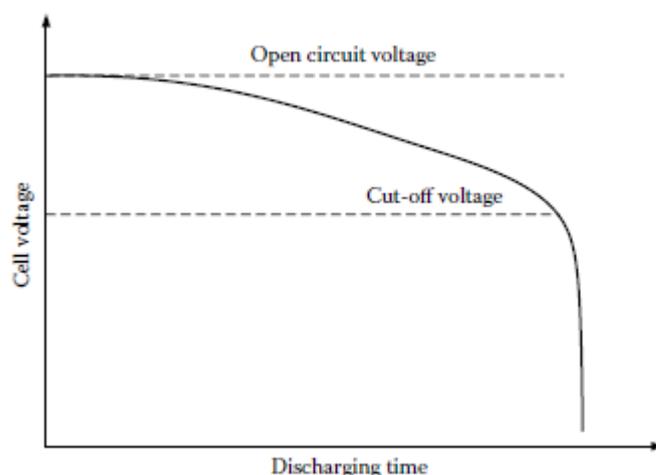


Figura 2.3 - Curva típica da tensão de uma bateria a descarregar [4].

Um parâmetro importante de uma bateria é o estado de carga (*State Of Charge - SOC*), que é definido como o rácio entre a capacidade que está na bateria e a capacidade total da bateria (onde $SOC = 100\%$). O SOC pode ser expresso como

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{idt}{Q(i)}, \quad (2.1)$$

onde SOC_0 é o valor inicial do SOC da bateria, $Q(i)$ é a capacidade da bateria em ampere-hora a uma corrente i . i é a corrente na bateria, sendo positiva na descarga e negativa na carga [4].

Existem várias características que actuam directamente na performance de uma bateria e que vão ser descritos de seguida. A capacidade da bateria em ampere-hora é relativa a uma corrente de descarga. Com diferentes correntes de descarga, a capacidade da bateria é alterada, diminuindo com o aumento da gama de corrente. A mesma capacidade diminui ao aumentar o número de ciclos (carga e descarga), o tempo armazenado (devido à auto-descarga) e diminuindo a temperatura. Estas características podem ser mostrados nos gráficos da Figura 2.4 (a)-(d). A tensão da bateria é função do SOC tal como mostra o gráfico (e) da mesma figura. Outra característica denota-se quando é imposto um degrau de corrente aos terminais da bateria, fazendo uma diminuição da tensão, que é típica nestes casos (Figura 2.4 (f)).

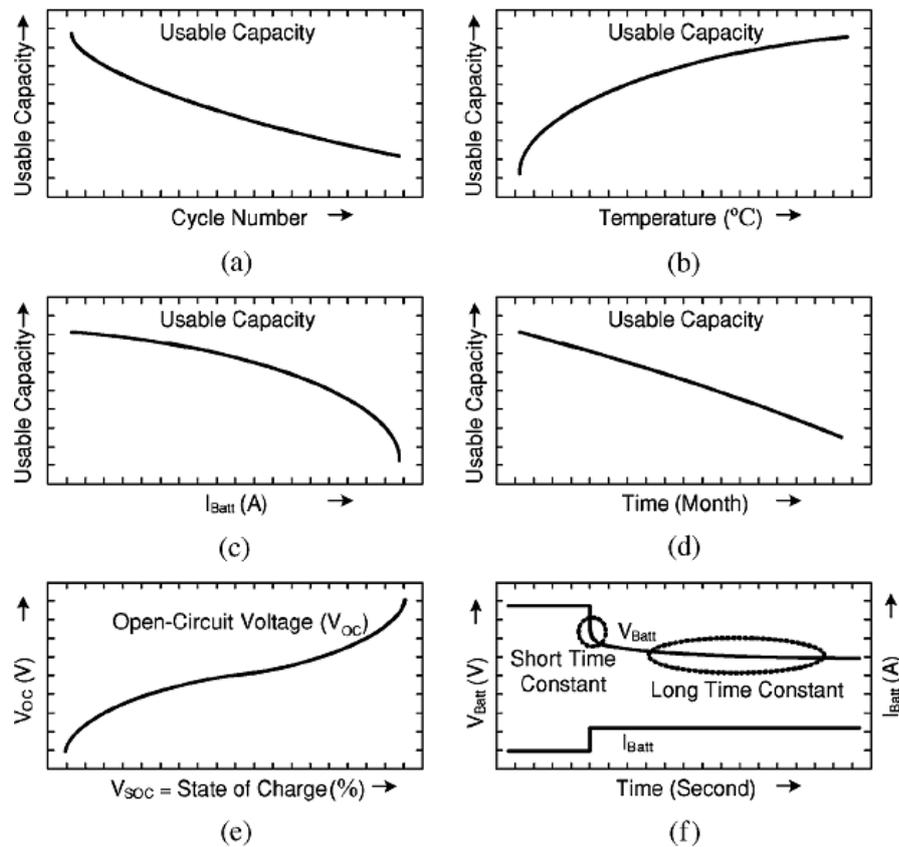


Figura 2.4 - Características de uma bateria em termos de: energia extraída segundo (a) o número de ciclos, (b) temperatura, (c) corrente, e (d) tempo de armazenamento (auto-descarga); (e) tensão de circuito aberto segundo o SOC; (f) resposta transitória impondo um degrau de corrente [6].

2.2.3 - Tipo de baterias

Na Tabela 2.2 são comparadas as diferentes tecnologias de baterias, perante os parâmetros mais relevantes. Na última linha encontram-se as metas da organização USABC (U.S. Advanced Battery Consortium), formada nos Estados Unidos da América pelo Departamento de Energia, na investigação de tecnologias de baterias para os EVs.

Tabela 2.2 - Comparação das diferentes tecnologias de baterias [7]

	Specific energy ^a (Wh/kg)	Energy density ^a (Wh/l)	Specific power ^b (W/kg)	Cycle life ^b (Cycles)	Projected cost ^d (US\$/kWh)
VRLA	30-45	60-90	200-300	400-600	150
Ni-Cd	40-60	80-110	150-350	600-1200	300
Ni-Zn	60-65	120-130	150-300	300	100-300
Ni-MH	60-70	130-170	150-300	600-1200	200-350
Zn/Air	230	269	105	NA ^c	90-120
Al/Air	190-250	190-200	7-16	NA ^c	NA
Na/S	100	150	200	800	250-450
Na/NiCl ₂	86	149	150	1000	230-350
Li-Polymer	155	220	315	600	NA
Li-Ion	90-130	140-200	250-450	800-1200	>200
USABC	200	300	400	1000	<100

NA: Not available

^a At C/3 rate

^b At 80% DOD

^c Mechanical recharging

^d For reference only

Nas aplicações em veículos, as características mais interessantes para as baterias são o tempo de vida, potência e energia específica bem como a sua densidade, o custo, e a segurança. No seguimento deste aspecto, as baterias mais adequadas na utilização em veículos eléctricos são as ácido chumbo (*valve regulated lead-acid - VLRA*), baterias baseadas em níquel e lítio [5].

O Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (USDOE) fixou objectivos, para as performances dos sistemas de baterias a utilizar em EVs, a um curto prazo de tempo, de modo a serem competitivos em relação à actual tecnologia de veículos. Na Tabela 2.3 estão quantificados os vários critérios de performance, para curto prazo, para um EV (pelo DOE) [8].

Tabela 2.3 - Critérios de performance do DOE para um EV (curto prazo) [8].

Performance criteria	EV-short term
Specific power, $W\ kg^{-1}$	300
Specific energy, $Wh\ kg^{-1}$	150
Power density, $W\ L^{-1}$	460
Energy density, $Wh\ L^{-1}$	230
Pack energy, kWh	40
Pack weight, kg	267
Pack volume, L	174
Life, years	10
Cycle life	1000
System price, \$	6000

De seguida apresentam-se alguns detalhes das três tecnologias de baterias mais usadas em EVs.

Bateria de ácido chumbo

A bateria ácido chumbo foi inventada nos finais do século XIX, por Gaston Plante, como já foi referido anteriormente. Desde então, este sistema de armazenamento de energia tem sido usado no sector automóvel e não só. Tem a vantagem de ser uma tecnologia barata e de ter uma densidade de potência relativamente elevada. É também uma bateria robusta e com elevada maturidade tecnológica. Devido aos elevados requisitos em termos de energia, dado a utilização de chumbo e a baixa densidade de energia, a utilização desta bateria num EV torna o sistema final pesado, sendo uma desvantagem [3, 5].

O sistema é composto por chumbo como material activo negativo, óxido de chumbo como material activo positivo e ácido sulfúrico diluído como electrólito. Durante a descarga, o material activo em ambas as placas de eléctrodos é transformado em sulfato de chumbo[5].

Diferentes baterias de ácido chumbo com melhores performances têm sido desenvolvidas para EVs e HEVs. O foco vai para o incremento de energia específica, chegando já a atingir os 43 kWh/Kg em certas baterias do tipo, bem como a diminuição do tempo de carga. O tempo de vida destas baterias consegue ultrapassar os 600 ciclos [3].

O GM EV-1 é o exemplo de um veículo eléctrico em que foi usado tecnologia de armazenamento ácido chumbo [7].

Bateria baseada em Níquel

Baterias alcalinas têm por base o níquel e usam uma solução alcalina como electrólito [7]. Níquel é um metal mais leve que o chumbo e tem propriedades electroquímicas boas para aplicações como o armazenamento de energia. Existem quatro tecnologias diferentes de baterias baseadas em níquel. São elas a níquel ferro, níquel zinco, níquel cádmio e níquel hidreto metálico (Ni-MH)[4].

As baterias níquel ferro foram comercializadas durante os primeiros anos do século XX. A sua utilização esteve focada em empilhadores, veículos espaciais, e alguns veículos de tracção eléctrica. A tensão nominal de circuito aberto é de 1,37V.

Este sistema de baterias tem problemas relativos a formação de gases (hidrogénio e oxigénio), corrosão e de auto-descarga. Necessitam de manter o seu nível de água. As vantagens são a alta densidade de potência comparadas com as baterias de ácido chumbo, e são capazes de resistir a mais de 1000 ciclos de descarga profunda.

A tensão nominal de circuito aberto de uma célula de níquel cádmio (Ni-Cd) é 1,3V. As vantagens desta tecnologia são a alta potência específica (mais de 220W/kg), longo ciclo de vida (mais de 1000), robusta, capacidade para ser carregada rapidamente, vasta gama de temperaturas de operação, e uma baixa taxa de auto-descarga [4]. No entanto este tipo de baterias tem vindo a ser descontinuada devido ao seu alto custo, a problemas ambientais e também cancerígenos relativos ao uso do cádmio [2, 5].

Já a bateria de níquel zinco não é alternativa na utilização nos EVs devido ao seu curto período de vida. A tensão nominal de uma célula deste tipo de tecnologia é de 1,65V [3, 5].

Neste grupo de tecnologia baseada em níquel, apenas a bateria níquel hidreto metálico é um sério concorrente nas aplicações em veículos. Esta bateria tem estado no mercado desde o ano de 1992. Esta tecnologia tem sofrido múltiplos avanços nestes anos, evidenciado pelo aumento na energia e potência específica.

A bateria Ni-MH é composta por hidróxido de níquel no eléctrodo positivo e por um multi-componente constituído por uma liga de vanádio, titânio, níquel e outros metais no eléctrodo positivo. A sua tensão nominal é de 1,2V e tem uma energia específica de 65Wh/kg, e uma potência específica de 200W/kg.

Como vantagem esta bateria é selada, não necessitando de manutenção, é amiga do ambiente (não contém cádmio), tem uma curva de descarga plana, e pode ser carregada em menos de 15 minutos. Tem excelentes propriedades térmicas, a possibilidade de operar a tensões elevadas, e tolerância a sobrecarga/descarga.

Contudo, e apesar de grandes desenvolvimentos, esta bateria comporta ainda de um custo elevado. Os materiais usados são caros e não se torna muito mais barata com uma produção em massa, comparada com as baterias de iões de lítio, evidenciado na Figura 2.5.[3-5]

A tecnologia Ni-MH tem sido considerada como uma boa escolha para aplicar em EVs e HEVs. As fabricantes Toyota e Honda têm usado esta bateria nos seus HEVs, o Prius, e os Insight e Civic.

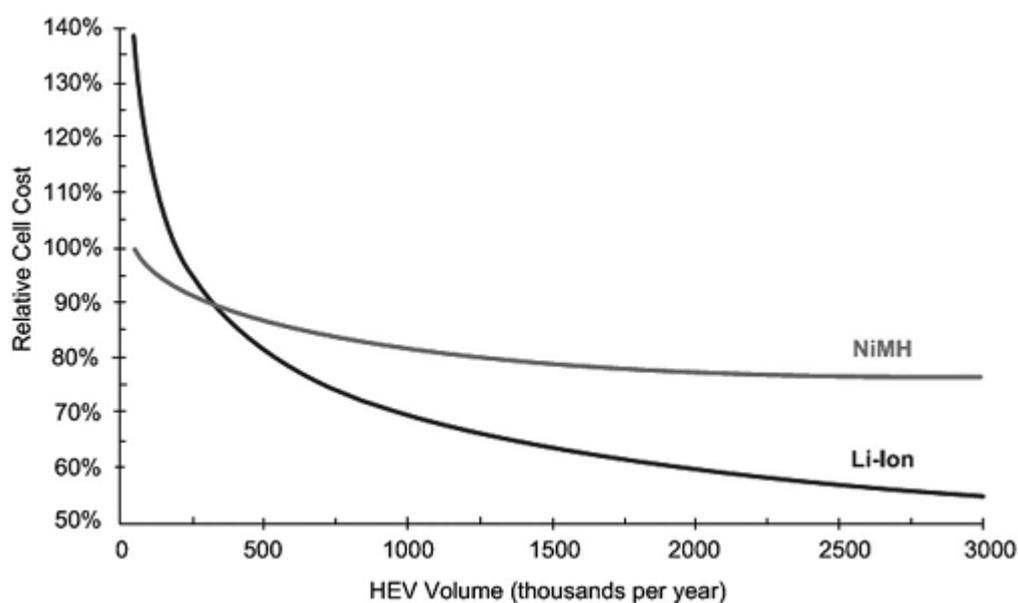


Figura 2.5 - Custo das células de Ni-MH e Li-ion em função da produção em volume de veículos [5].

Bateria baseadas em lítio

O lítio é o mais leve de todos os metais e apresenta características interessantes do ponto de vista electroquímico. Permite uma tensão termodinâmica bastante elevada, no que resulta em altas energias e potências específicas. Existem duas grandes tecnologias de baterias de lítio: lítio-polímero (Li-Polymer ou Li-P) e iões de lítio (Li-ion ou Li-i).

A bateria de lítio-polímero baseia-se no uso de metal de lítio e um óxido metálico para os eléctrodos negativo e positivo, respectivamente. O óxido metálico é formado por uma estrutura em camadas, no qual iões de lítio podem ser inseridos ou removidos na carga ou descarga, respectivamente. O electrolítico é um polímero sólido e fino, o qual oferece grande segurança e flexibilidade de design.

A célula de Li-Polymer mais interessante utiliza óxido de vanádio. Tem uma tensão nominal de 3V, uma energia específica de 155Wh/kg e uma potência específica de 315W/kg. As maiores vantagens são a baixa taxa de auto-descarga, cerca de 0,5%, capacidade de fabrico com vários tamanhos e feitios, é segura (reduzida actividade do lítio de electrólito sólido), e pode ser rapidamente recarregada em menos de 90 minutos. No entanto, tem a desvantagem, de apenas operar a temperaturas entre os 65 e os 120°C, e de ser difícil de dimensionar a tecnologia para utilizar num EV [2, 4].

A tecnologia da bateria de iões de lítio foi divulgada em 1991 e, desde então, tem vindo a ser desenvolvida e investigada, sendo hoje em dia considerada a bateria recarregável mais promissora no futuro dos EVs. Existem já inúmeros veículos que incorporam esta tecnologia e é expectável que venha a substituir completamente as baterias de Ni-MH neste sector.

Esta bateria é constituída, no eléctrodo positivo, por óxido metálico, carbono no eléctrodo negativo, e sal de lítio em solvente orgânico no electrólito. A reacção electroquímica geral é descrita em **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** [2, 4, 5]. Na Figura 2.6 encontram-se as várias tecnologias de baterias de iões de lítio existentes para os eléctrodos, bem como as características mais relevantes.

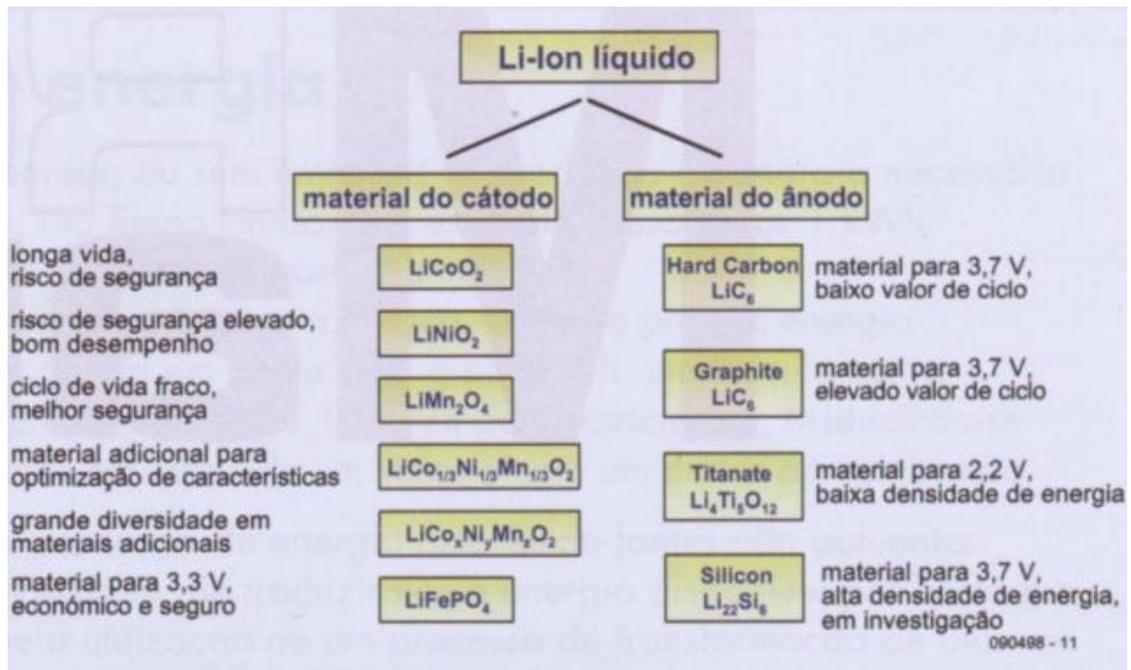


Figura 2.6 - Diferentes eléctrodos para diferentes tecnologias de iões de lítio, e suas características [9].

De maneira geral e para as tecnologias de iões de lítio mais utilizadas, como o caso do cobalto e o níquel oxidado, as vantagens são o baixo efeito de memória, a alta energia específica (cerca de 100Wh/kg), alta potência específica (cerca de 300W/kg), e um tempo de vida de 1000 ciclos. As principais desvantagens são o curto período de vida em termos temporais, o custo, o funcionamento a altas temperaturas, e a sobrecarga e sobredescarga [2, 4, 5, 7].

A segurança é um factor relevante e um problema para este tipo de baterias, por isso, investigações foram e têm sido efectuadas para a solucionar esta questão. Existem desenvolvimentos nos tipos de matérias usados como eléctrodo positivo para, tanto reduzir o custo, bem como melhorar a segurança. Nos eléctrodos negativos o foco vai para matérias activos que reduzam o peso. No caso dos electrólitos as investigações centram-se em matérias capazes de operarem numa maior gama de temperaturas, engrandecendo a segurança, diminuindo a reactividade enquanto se mantém a estabilidade [8].

A tecnologia de iões de lítio mais recentemente comercializada é a célula ferro fosfato (Li_xC_6/Li_yFePO_4). O material utilizado no cátodo tem um baixo preço, é de fácil fabrico, e

bastante segura. Tem uma tensão na célula de 3,3V, um quanto inferior às que se baseiam em óxidos (3,5-4.0V) [8].

Já vários fabricantes utilizam a tecnologia de íões de lítio em EVs. O Tesla é um carro eléctrico desportivo. Possui um motor de 185kW de potência o que permite atingir uma velocidade máxima, limitada electronicamente, de 209 Km/h, tem uma aceleração dos zero aos 100 km/h em 4 segundos. Graças à utilização de baterias de íões de lítio frui de uma autonomia de 320 km, bastante elevada para a normal gama de veículos eléctricos a baterias, disponíveis actualmente no mercado.

Uma das principais características que um veículo de competição tem é a necessidade de altas potências para as acelerações. A tecnologia de íões de lítio verifica-se com grandes potencialidades na utilização para esta área, devido à sua elevada potência específica, não deixando de exaltar também a elevada energia específica.

Na Figura 2.7 são apresentadas as atributos dos três tipos de baterias focados anteriormente, bem como do ultra-condensador, no sentido de comparar as características de um sistema de armazenamento de energia.

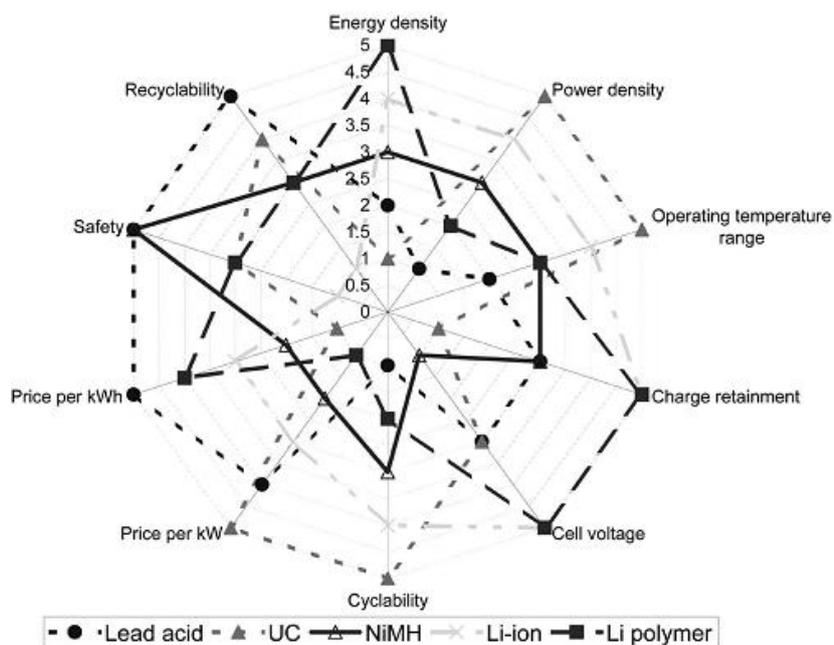


Figura 2.7 - Comparação de atributos de vários tipos de baterias e ultra-condensadores [5].

Baterias Futuras

Actualmente, o desenvolvimento de novas tecnologias de baterias está bem assente na comunidade científica. A característica que tem mais foco é a energia específica, dada a sua importância nos EVs.

As células de baterias metal/ar são uma das principais tecnologias, pois conseguem oferecer, pelo menos teoricamente, alta energia específica. Existem no entanto dois grandes problemas com este tipo de baterias. Têm uma elevada resistência interna, mesmo com baixas correntes, baixando a sua eficiência de carga e descarga para os 50-60%, enquanto que

a bateria de lítio convencional consegue superar os 80%. Outra desvantagem prende-se com o facto ter poucos ciclos de vida. O sistema zinco/ar e lítio/ar são os dois tipos de baterias metal/ar mais promissores nesta área.

Outra tecnologia em desenvolvimento é a célula lítio/enxofre. Tem a vantagem de usar o enxofre que é um elemento bastante barato. Necessita, no entanto, ainda de algum desenvolvimento pois não tem uma longa vida em termos de ciclos. O desenvolvimento desta tecnologia pode levar a uma bateria capaz de obter uma energia específica de 800Wh/kg, que pode ser uma vantagem em relação às outras baterias, em termos de custo, impacto ambiental, e performance [8].

2.2.4 - Modelo da bateria

Para a simulação e desenvolvimento do sistema de alimentação e estratégias de controlo, é importante desenvolver um modelo, bastante aproximado, dos componentes do sistema de armazenamento utilizados.

Neste caso, diferentes modelos de baterias, com diferentes graus de complexidade têm sido desenvolvidos. Os modelos criados dividem-se em três categorias: modelos electroquímicos, modelos matemáticos, e modelos eléctricos.

Os modelos electroquímicos são usados principalmente para otimizar os aspectos físicos das baterias, caracterizar os mecanismos fundamentais do fornecimento de energia e relacionar os parâmetros de desenho da bateria com a informação macroscópica (corrente e tensão da bateria) e microscópica (distribuição da concentração). No entanto estes tipos de modelos são complexos e são necessários dias para fazer a simulação. Isto porque eles envolvem algoritmos numéricos complexos, e requerem informação específica da bateria, que em geral é difícil de obter.

Os modelos matemáticos são, na maior parte dos casos, muito abstractos para serem incorporados na prática, mas ainda assim úteis no sentido do design do sistema. Adoptam equações empíricas ou métodos matemáticos, para preverem comportamentos no sistema, tais como a capacidade, a eficiência ou o comportamento temporal. Como contrapartida, este tipo de modelo não consegue dar informações sobre a performance corrente-tensão, essencial para a simulação e optimização do circuito da bateria. De maneira geral, os modelos matemáticos são usados apenas para aplicações específicas com erros nos resultados na ordem dos 5 a 20%.

O modelo eléctrico utiliza a combinação de fontes de tensão, resistências e condensadores. Tem uma precisão entre os 1 e os 5% de erro. Este tipo de modelo é bastante intuitivo e é bastante útil pois permite ser utilizados em simuladores com possibilidade de ser interligado com outro tipo de circuitos. Existem inúmeros modelos eléctricos de baterias, desde as de ácido chumbo até às mais recentes baterias de lítio [6, 10].

O modelo eléctrico mais simples consiste numa fonte de tensão ideal em série com uma resistência interna. No entanto, dada a sua simplicidade não leva em consideração o estado de carga da bateria (SOC).

A maioria dos modelos de baterias recai sobre três categorias: modelo Thevenin, impedância, e runtime. São também usadas combinações entre eles.

O modelo eléctrico Thevenin (Figura 2.8(a)) consiste numa fonte de tensão de circuito aberto $V_{OC}(SOC)$ constante, a um determinado SOC, numa resistência série (R_{Series}) e numa malha RC paralela ($R_{Transient}$ e $C_{Transient}$) para prever a resposta da bateria aos regimes transitórios de carga. Devido a se assumir a tensão de circuito aberto constante, não é possível observar as variações da tensão em regime estacionário, bem como a informação a nível temporal da bateria. Ao aumentar o número de malhas RC paralelas, a precisão da resposta do modelo aumenta.

O modelo de impedância (Figura 2.8(b)), tal como o modelo Thevenin, apenas se torna preciso para um determinado SOC e temperatura. Utiliza, porém o método de espectroscopia dieléctrica para prever respostas AC.

Por fim, o modelo eléctrico runtime compreende um circuito algo complexo (Figura 2.8(c)), no sentido de prever respostas ao nível temporal (runtime response), e variações em regime estacionário da bateria, para correntes constantes. Com correntes de carga alternadas, a precisão do modelo diminui.

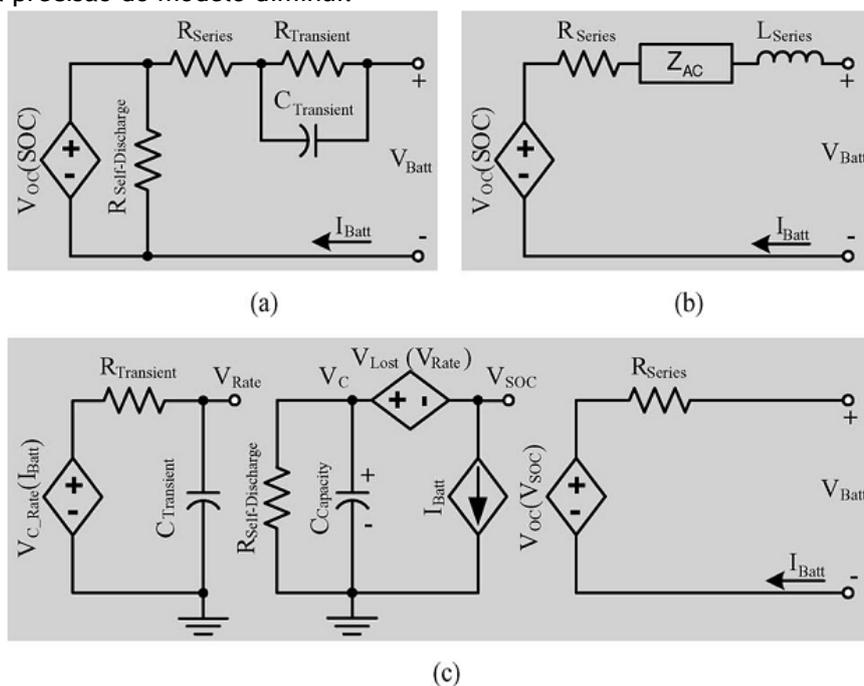


Figura 2.8 - Modelo eléctrico (a) Thevenin, (b) de impedância, e (c) runtime [6].

Com a combinação destes circuitos, existe a possibilidade de aproveitar as vantagens de cada modelo de forma a aumentar as características modeladas. Vários autores publicaram modelos que utilizam este método para aumentarem a precisão em termos de previsão do

SOC, resposta transitória, runtime e efeitos da temperatura na modelação de vários tipos de baterias [6, 10].

No caso dos veículos eléctricos, existe uma característica que deve ser modelada, para aumentar o rigor da simulação, que é o caso das respostas transitórias para cargas de curta duração (menor que 1 segundo). Kroeze, em [10], demonstra um modelo eléctrico para baterias de iões de lítio, Ni-MH e ácido-chumbo, capaz de modelar os parâmetros necessários para a simulação de baterias de um EV.

Extracção de parâmetros

Para determinar os parâmetros de um modelo é necessário efectuar uma série de testes experimentais. Estes testes terão de levar em conta todas as características que se pretende modelar. Os principais testes são então: descarregar a bateria perante diferentes temperaturas, diferentes números de ciclos de vida, e diferentes tempos de armazenamento (informação de auto-descarga) para se saber as suas influências na capacidade da bateria; a medição da tensão de circuito aberto com diferentes estados de carga, e diferentes impulsos de corrente (resposta transitória); e a descarga da bateria com várias níveis de correntes.

Para tornar o processo mais rápido e simples é normal conceber-se um sistema capaz de testar as baterias, com a monitorização de todos os dados necessários para a parametrização do modelo.

Os parâmetros de um modelo são normalmente função de múltiplos factores, como a corrente, a temperatura, o SOC, e número de ciclos de descarga que a bateria já sofreu. Fazer a extracção dos parâmetros segundo todos estes factores é, por isso, uma tarefa complexa. São tomadas simplificações com o intuito de aligeirar o processo.

Os parâmetros são calculados interpolando os resultados dos testes com expressões polinomiais e exponenciais que são a solução dos parâmetros do modelo. Estes problemas podem não ser resolvidos com os métodos numéricos normais. Uma solução é recorrer a métodos evolucionários, com o sentido de utilizar algoritmos de optimização avançados [11, 12].

2.2.5 - Ultra-condensadores

Um ultra-condensador caracteriza-se por ter uma potência específica elevada, que pode alcançar os 3 kW/kg, e ciclos de vida superiores a 500 mil, muito superior do que qualquer tipo de bateria. Contudo a sua energia específica é bastante baixa, sendo necessário actuar juntamente com outra fonte de energia [2, 4].

A tecnologia do ultra-condensador, para aplicações em veículos eléctricos, tem sido desenvolvida desde os anos 90. A maior parte dessa investigação recai sobre os condensadores de dupla camada (electric double-layer capacitor - EDLC) que usam eléctrodos de carbono poroso. A evolução desta tecnologia depende de progressos nos materiais e de combinações para alcançar melhores performances [2].

A energia é armazenada acumulando e separando fisicamente cargas opostas. As cargas são armazenadas em duas placas paralelas (eléctrodos) divididas por um material dieléctrico. A capacidade C representa a relação entre a carga armazenada, q , e a tensão, V , entre os eléctrodos, como mostra a equação (2.3). A capacidade depende da permissividade do dieléctrico, ϵ , da área das placas, A , e da distância entre as placas, d , tal como em (2.4). A equação (2.5) refere que a energia armazenada no condensador depende da sua capacidade e do quadrado da tensão.

$$q = CV, \quad (2.3)$$

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (2.4)$$

$$E = \frac{1}{2}CV^2, \quad (2.5)$$

A quantidade de energia armazenada num condensador pode ser aumentada ao aumentar a capacidade ou a tensão. No entanto a tensão é limitada pela tensão de ruptura do dieléctrico, que está também directamente ligada à distância entre as placas. A capacidade pode ser engrandecida, aumentando a área das placas, aumentando a permissividade, ou diminuindo a distância entre as placas [13]. Até agora, a tensão de uma célula de um UC com electrólito aquoso é cerca de 0,9V, e com electrólito sólido é de 2,3 a 3,3V [4].

A capacidade desta tecnologia ter bastantes ciclos de vida deve-se a, idealmente, não haver reacções químicas nos eléctrodos. Outra vantagem dos UCs é a alta eficiência, que é apenas função da resistência óhmica dos eléctrodos.

Uma característica única desta tecnologia é o facto de a sua tensão ser directamente proporcional ao seu estado de carga, e de também poder ser completamente descarregado. A Figura 2.9 mostra a tensão de circuito aberto normalizada para diferentes tipos de baterias e o UC [5].

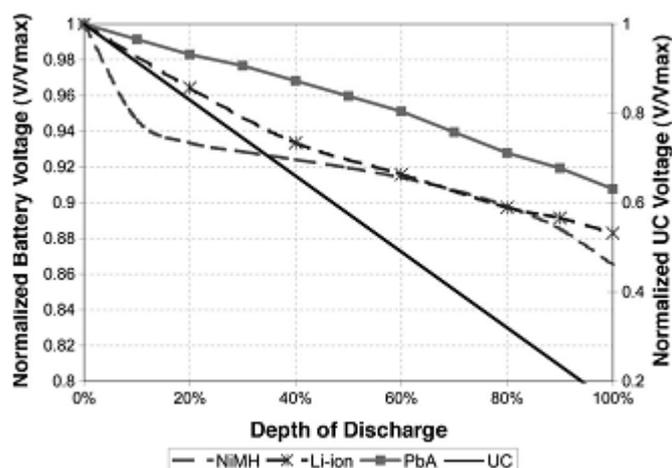


Figura 2.9 - Alteração da tensão de circuito aberto normalizada (V_{oc}/V_{max}) para vários tipos de baterias e o UC [5].

Segundo o Departamento de energia dos Estados Unidos (USDOE), os objectivos em termos de desenvolvimento da tecnologia dos UCs, para integração em EVs e HEVs, são obter células com mais de 15Wh/kg de energia específica e 1600W/kg de potência específica. Até agora, nenhuns dos ultra-condensadores presentes no mercado alcançaram a meta da energia específica.

Existem actualmente vários fabricantes de UCs que comercializam, tanto células simples, como módulos, tais como a Maxwell, Ness, EPCOS, Nippon Chemi-Com, entre outros (Tabela 2.4) [14].

Tabela 2.4 - Características das células de UCs de vários fabricantes [14].

Device	V rated	C (F)	R (mOhm)	RC (sec)	Wh/kg (1)	W/kg (95%) (2)	W/kg Match. Imped.	Wgt. (kg)	Vol. lit.
Maxwell**	2.7	2800	.48	1.4	4.45	900	8000	.475	.320
Ness	2.7	10	25.0	.25	2.5	3040	27000	.0025	.0015
Ness	2.7	1800	.55	1.00	3.6	975	8674	.38	.277
Ness	2.7	3640	.30	1.10	4.2	928	8010	.65	.514
Ness	2.7	5085	.24	1.22	4.3	958	8532	.89	.712
Asahi Glass (propylene carbonate)	2.7	1375	2.5	3.4	4.9	390	3471	.210 (estimated)	.151
Panasonic (propylene carbonate)	2.5	1200	1.0	1.2	2.3	514	4596	.34	.245
Panasonic	2.5	1791	.30	.54	3.44	1890	16800	.310	.245
Panasonic	2.5	2500	.43	1.1	3.70	1035	9200	.395	.328
EPCOS	2.7	3400	.45	1.5	4.3	760	6750	.60	.48
Okamura Power Sys.	2.7	1350	1.5	2.0	4.9	650	5785	.21	.151
ESMA	1.3	10000	.275	2.75	1.1	156	1400	1.1	.547

(1) Energy density at 400 W/kg constant power, Vrated - 1/2 Vrated
(2) Power based on $P=9/16*(1-EF)^*V^2/R$, EF=efficiency of discharge
** Except where noted, all the devices use acetonitrile as the electrolyte

Mais recentemente, investigadores têm juntado esforços em combinar as propriedades das baterias com as dos condensadores num único dispositivo. Uma das tecnologias mais recentes, leva à combinação das características dos condensadores com as de iões de lítio. Esta combinação aumenta a energia específica deste tipo de dispositivos [15].

Outro método para garantir mais energia nos UCs é aumentar a tensão aos seus terminais. Para isso é necessário investigar materiais que possam servir de dieléctrico, com alta permissividade.

A empresa EESor, baseada nos Estados Unidos da América, anunciou ter inventado um dispositivo capaz de funcionar a uma tensão de até 3500 V, com uma capacidade total de 30 Farads, o que fornece um armazenamento de 52,22 kWh de energia! O segredo está nas camadas do dieléctrico, formadas de um material de alta permissividade. A patente aclama também que a potência de carga e descarga é praticamente ilimitada, podendo ser carregado nuns míseros 3 minutos! A patente [16] fornece uma tabela de comparação entre as diferentes tecnologias de armazenamento a baterias e o EESU (Tabela 2.5).

Sendo esta tecnologia possível de ser comercializada, poderá revolucionar o mundo do armazenamento de energia, sobretudo o dos veículos eléctricos.

Tabela 2.5 - Comparação das diferentes tecnologias de armazenamento com o EESU [16].

The parameters of each technology to store 52.22 kW · h of electrical energy are indicated - (data from manufacturers' specification sheets).

	EESU	NiMH	LA (Gel)	Ni-Z	Li-Ion
Weight (pounds)	286.56	1716	3646	1920	752
Volume (inch ³)	4541	17,881	43,045	34,780	5697
Discharge rate/ 30 days	0.1%	5%	1%	1%	1%
Charging time (full)	*3-6 min	1.5 hr	8.0 hr	1.5 hr	6.0 hr
Life reduced with deep cycle use	none	moderate	high	moderate	high
Hazardous materials	NONE	YES	YES	YES	YES

*The charging time is restricted by the converter circuits not the EESU.

Modelo de um ultra-condensador

O ultra-condensador pode, tal como a bateria, também ser modelado com um circuito eléctrico equivalente. A performance de um UC é representada pela tensão ao terminais durante a descarga e carga com diferentes fluxos de correntes. O modelo mais simples consiste na capacidade C , a resistência série R_s (também chamada de resistência série equivalente - R_{ESR}) que simula as perdas óhmicas, e a resistência de fugas do dieléctrico R_L (Figura 2.10). A tensão nos terminais do UC durante a descarga pode ser expressa como

$$V_t = V_C - iR_s . \quad (2.6)$$

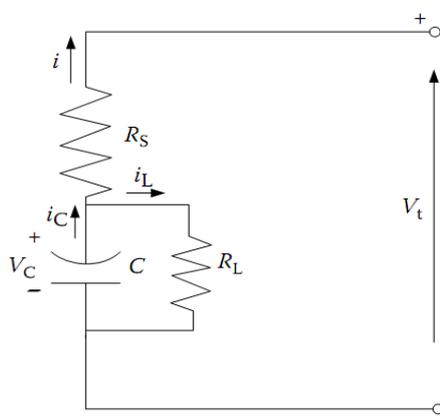


Figura 2.10 - Circuito equivalente de um UC [4].

No artigo [17], o autor compara o resultado da simulação deste modelo com um teste experimental de um UC na carga e descarga (com as mesmas características). A vantagem da utilização deste modelo é a sua simplicidade, tornando fácil a incorporação na plataforma de software bem como o processamento. A principal desvantagem é o facto de o modelo RC não ser capaz de capturar a subida e queda não linear da tensão, bem como a diferença de tensão depois de se parar a carga e a descarga.

Outros modelos mais detalhados foram investigados de forma a obter uma melhor modelização. Estes modelos podem ser categorizados em três classes: o modelo RC de ramo paralelo, o modelo RC de linha de transmissão, e o modelo RC série-paralelo. O número de ramos RC em cada modelo pode ser alterado, aumentando ou diminuindo a precisão. Normalmente são usadas 2 a 3 malhas RC.

O modelo RC de ramo paralelo tem o objectivo de simular o comportamento do UC durante a carga e descarga. Quando o carregamento (descarga) é parado, a tensão vai diminuindo (aumentando) durante vários minutos até ficar constante. Cada malha RC tem uma constante de tempo diferente: rápido (R_f e C_f), médio (R_m e C_m), e lento (R_s e C_s) (Figura 2.11). O termo rápido demonstra o comportamento de carga e descarga na ordem dos segundos. O termo médio domina a escala dos minutos. O ramo lento rege a característica da carga e descarga na ordem das dezenas de minutos.

O modelo RC de malha paralela tem uma boa resposta do comportamento dinâmico do UC durante o processo de carga e descarga. A precisão do modelo é mais elevada do que o modelo RC simples. No entanto, para tensões abaixo dos 40% da tensão nominal, o erro entre o modelo e o comportamento real é mais elevado. Os parâmetros podem ser facilmente retirados por testes experimentais simples [17].

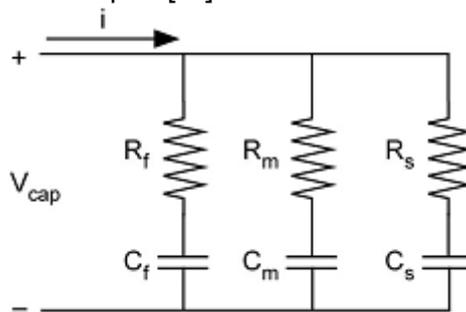


Figura 2.11 - Modelo RC de malha paralela [17].

O modelo RC linha de transmissão (Figura 2.12) é baseado na teoria do eléctrodo poroso. Desta teoria, o modelo é referido como um modelo de uma linha de transmissão. A estrutura física e as características do UC são directamente simuladas. Tal como o anterior, também este modelo é capaz de simular os comportamentos dinâmicos e temporais, sendo os parâmetros modelizados por testes experimentais a corrente constante. Tem a desvantagem de ter uma expressão analítica complexa que não é adequada para simulação.

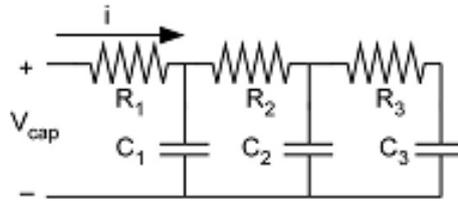


Figura 2.12 - Modelo RC de linha de transmissão [17].

A Figura 2.13 mostra o circuito com três ramos RC série-paralelo. R_a representa a R_{ESR} , C_a e os ramos RC paralelos equivalem às impedâncias dos poros do UC. Para aumentar a precisão do modelo, os parâmetros podem depender da temperatura, tensão e frequência de operação do UC. Os parâmetros do modelo podem ser adquiridos pelo teste da espectroscopia dielétrica.

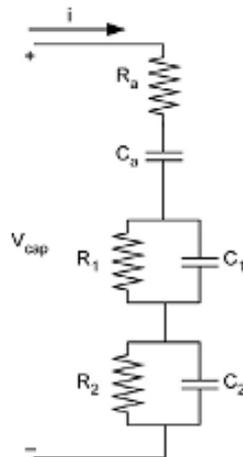


Figura 2.13 - Modelo RC de malhas séries paralelas [17].

De reparar que os modelos RC anteriores não modelizam a resistência de fugas do UC, no entanto ela deve ser considerada. O UC tem ainda associada uma indutância parasita que deve ser modelizada, especialmente a funcionamentos a uma frequência mais elevada. Lisheng, em [17], sugere um modelo geral, em que o número de malhas pode ser estendido para o infinito (Figura 2.14).

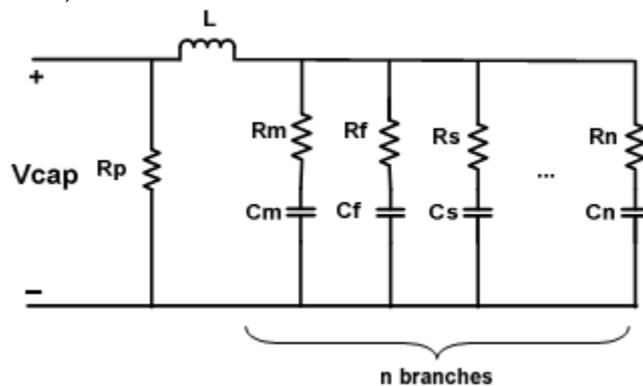


Figura 2.14 - Modelo geral RC ramos paralelos [17].

2.2.6 - Topologia híbrida de armazenamento

Devido às acelerações e travagens de um veículo eléctrico de competição, o perfil de carga e descarga do armazenamento de energia é bastante variado. A potência média

necessária do ESS é bastante mais baixa do que nos picos de potência, das acelerações, de curta duração. Tendo presente as tecnologias de baterias da actualidade, estas têm de assegurar um trade-off entre energia específica, potência específica e ciclos de vida. A dificuldade em obter simultaneamente valores elevados destas três condições leva a sugerir que o sistema de armazenamento deverá ser híbrido, combinando fontes de alta energia e fontes de alta potência.

As fontes de energia específica são principalmente as baterias e as fuel cells, enquanto que a fonte de potência que tem recebido mais atenção tem sido os ultra-condensadores [4, 7]. A Figura 2.15 mostra que ao combinar baterias com UCs eleva a performance do ESS [5]. Nos últimos anos diferentes topologias para sistemas de armazenamento de energia híbrido (hybrid energy storage system - HESS) têm sido estudadas.

O tipo de conexão mais simples está representada na Figura 2.16 (conexão passiva paralela), em que as duas tecnologias de armazenamento estão ligadas ao barramento DC paralelamente. Esta configuração obriga que a tensão dos dois ESS seja igual, o que limita a potência fornecida pelo UC. A melhor aplicação para esta configuração é em sistemas que necessitem de um pulso elevado de potência (arranque de um motor) seguido por um longo período de baixa potência. Devido a não se poder controlar o fluxo de potência de cada fonte, esta topologia não tem grande vantagem na utilização em EVs [18].

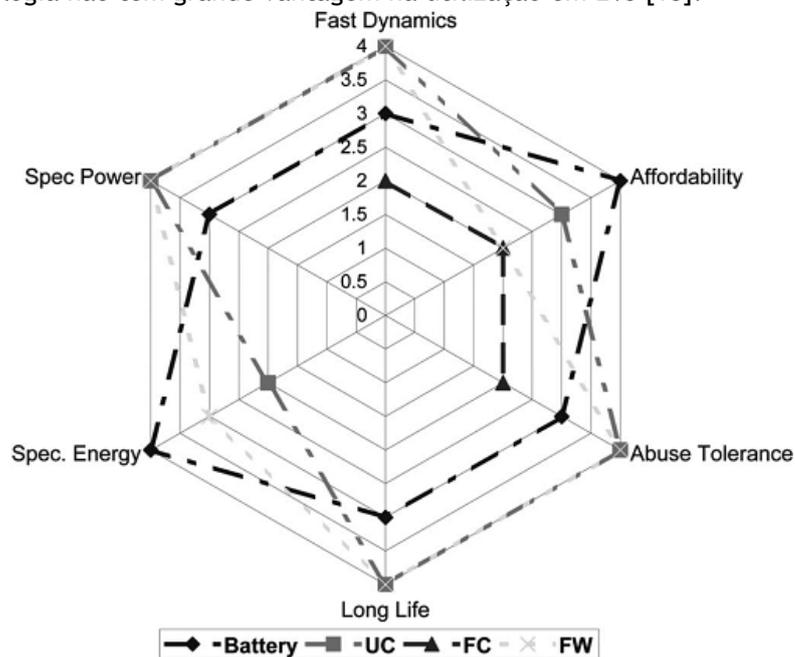


Figura 2.15 - Comparação dos parâmetros das tecnologias de armazenamento de energia [5].



Figura 2.16 - Configuração passiva paralela [19].

Na Figura 2.17 encontra-se o diagrama da configuração UC/bateria. Com a utilização de um conversor bidireccional DC/DC para fazer a interface com o UC, é possível diferencia a tensão, controlando a potência e energia fornecida pelo UC. A bateria está directamente ligada ao barramento DC, podendo-se manter a tensão desse barramento praticamente constante. Tem o inconveniente de a energia de travagem regenerativa não poder ser controlada para ser absorvida pelo UC. A tensão da bateria tem de ser a que se pretende para o bom funcionamento do inversor. Esta é a topologia HESS mais estudada e investigada [20].

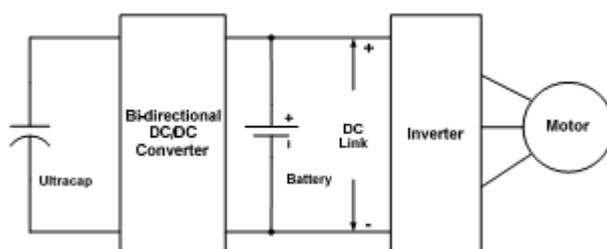


Figura 2.17 - Configuração ultra-condensador/bateria [20].

Trocando o UC pela bateria obtém-se a configuração representada no diagrama da Figura 2.18. Neste caso é a tensão da bateria que pode ser mantida a um nível inferior ao do barramento. O UC está ligado directamente ao barramento trabalhando com um filtro passa baixo. Esta topologia admite a possibilidade de flutuação de tensão no barramento, no entanto, a eficiência do inversor baixa [5, 20].

Para aumentar a variação da tensão de funcionamento do UC, da topologia anterior, foi adicionada outro conversor bidireccional entre o UC e o barramento DC (Figura 2.19).

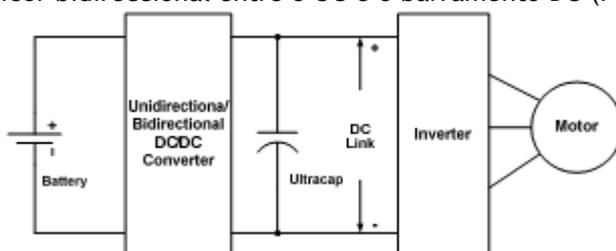


Figura 2.18 - Diagrama de configuração bateria/ultra-condensador [20].

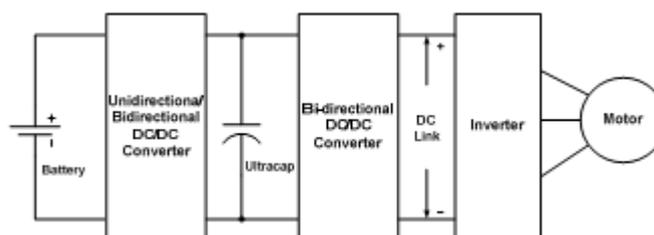


Figura 2.19 - Configuração em cascata [20].

A topologia da Figura 2.20 caracteriza-se por cada fonte de energia estar ligada ao barramento DC por um conversor dedicado. Dada esta característica, é possível retirar o máximo rendimento de cada fonte providenciando um elevado nível de flexibilidade. Permite a implementação de várias topologias e estratégias de controlo [5, 18, 20].

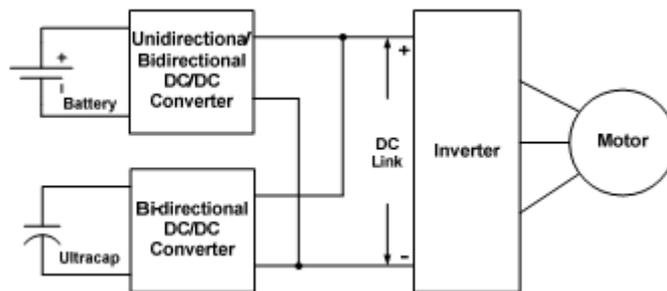


Figura 2.20 - Configuração de múltiplos conversores [20]

Outro tipo de topologia alternativa é a estrutura de múltiplas entradas (Figura 2.21). Todo o sistema é visto como um único processo com múltiplas portas de interface, regulando as tensões e gerindo os fluxos de potência. Tem a vantagem de ser possível partilhar todos os recursos da estrutura (dispositivos de conversão) e diminuir a redundância. Como resultado a eficiência aumenta, pela diminuição das perdas. Contudo, esta topologia está mais associada a sistemas onde incluem fontes de energia, como por exemplo células de combustível, painéis fotovoltaicos, entre outros, e ESS [21].

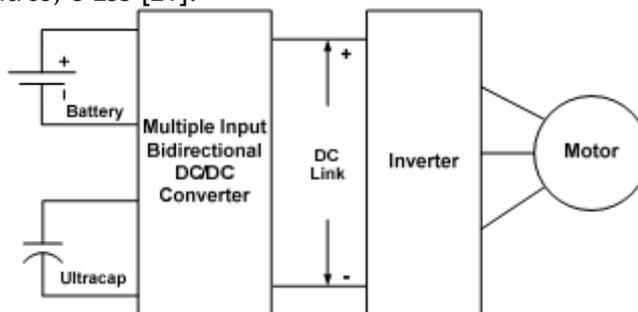


Figura 2.21 - Configuração de um conversor de múltiplas entradas [20].

2.3 - Sistemas de carga de baterias

A carga é o processo de restaurar a carga, de uma bateria descarregada, até à sua capacidade nominal. Para que a bateria possa receber energia, deve ser carregada com um método apropriado, definido pela tecnologia da bateria. Torna-se necessária a utilização de conversores de electrónica de potência, controlados de modo a respeitar as exigências do método de carga.

2.3.1 - Métodos de carga

O método de carga é determinado pela tolerância da bateria às sobrecargas. Em geral, as baterias formadas por electrólitos aquosos, como as ácido-chumbo, níquel-cádmio e Ni-MH têm reacções gasosas que permitem a sobrecarga. Ao contrário da tecnologia de iões de lítio que não permite. Neste último caso, as baterias devem ter um controlo individual por célula, designado de balanceamento celular (de cell balancing). De referir que a sobrecarga provoca degradação na bateria, diminuindo o seu tempo de vida.

Existem quatro métodos básicos de carga que se definem por ser em tensão constante, corrente constante, a combinação destas duas (corrente e tensão), e impulsos de corrente.

Em tensão constante, a corrente fornecida à bateria vai diminuindo até uma corrente mínima ser atingida. As tecnologias de ácido-chumbo e íões de lítio são as que usam mais frequentemente este modo.

Em corrente constante, a tensão varia, aumentando para manter a referência de corrente, até alcançar a tensão que indica carga completa. Este sistema é usado pelas baterias de níquel-cádmio e Ni-MH.

Um modo de carga bastante usado é o de corrente constante seguida de tensão constante. A bateria começa por receber uma corrente constante até a tensão atingir o limite (no caso das Ni-MH e ácido-chumbo é a tensão a partir da qual começa-se a formar gases). Depois o controlo passa a ser feito a uma tensão constante, fazendo diminuir a corrente até um valor mínimo. As três tecnologias de baterias podem ser carregadas por este método.

O modo de carga por impulsos de corrente (pulse charger) caracteriza-se por carregar a bateria com impulsos de corrente, fornecendo um período de descanso com cerca de 20 a 30 milissegundos. Esta estratégia permite que as reacções químicas estabilizem, neutralizando o electrólito. Este método pode reduzir reacções químicas indesejadas, tais como a formação de gases e aparecimento de cristais, aumentando assim o número de ciclos de vida da bateria.

O Reflex ou impulso de carga negativo utiliza a estratégia do modo anterior, com a adição de um impulso negativo de curta duração no período de descanso. Este impulso de descarga tem uma duração típica de 5 milissegundos, e tem o valor de duas a três vezes o valor do impulso de carga. O impulso negativo desaloja qualquer bolha de gás que possa ser produzida nos eléctrodos durante a carga rápida, acelerando a estabilização do processo e por consequente todo o sistema de carga, prevenindo a degradação da bateria.

Existem outros modos de carga de baterias, mas no entanto, não têm grande importância no tema dos veículos eléctricos.

Os métodos de saber quando finalizar a carga variam conforme a tecnologia da bateria. Em baterias de íões de lítio o sistema de carga é normalmente feito em corrente constante - tensão constante, e a tensão da célula ao atingir os 4,2V mantém-se constante até a corrente descer abaixo de um limite (3% da corrente nominal). Normalmente a carga demora três horas.

Já nas baterias de Ni-MH a carga convém que seja rápida, já que reduz as formações cristalinas, que é causa do efeito memória neste tipo de baterias. O método para saber se a carga está finalizada é muito mais complicado que o anterior. Neste caso do Ni-MH, a tensão é praticamente constante durante todo o SOC (cerca de 8 a 16mV de variação). A solução encontrada é a de combinar a variação de tensão, o aumento da temperatura, e temporizadores para saber quando terminar a carga [22].

2.3.2 - Topologias de conversão

Os conversores de electrónica de potência têm um papel fundamental no sistema de carga das baterias, permitem fazer o controlo conforme o modo de carga da bateria.

O carregador para um EV deve ser ligado à rede de distribuição, podendo ser no sistema monofásico ou trifásico. Num veículo eléctrico de competição pretende-se que as baterias sejam carregadas a uma potência mais elevada com o intuito de diminuir o tempo de carga. Assim sendo, a solução monofásica fica excluída desde a partida.

Outro aspecto é o do factor de potência, que se quer controlado e próximo do valor unitário, diminuindo assim a energia reactiva injectada na rede.

Referências

1. Chan, C.C., *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2007. **95**(4): p. 704-718.
2. Bansal, R., *Electric Vehicles*, in *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. 2005, CRC Press. p. 55-96.
3. Linden, D. and T.B. Reddy, *Handbook of Batteries (3rd Edition)*. 2002, McGraw-Hill.
4. *Front Matter*, in *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. 2009, CRC Press.
5. Lukic, S.M., et al., *Energy storage systems for automotive applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008. **55**(6): p. 2258-2267.
6. Chen, M. and G.A. Rincon-Mora, *Accurate electrical battery model capable of predicting, runtime and I-V performance*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006. **21**(2): p. 504-511.
7. Chan, C.C., *The state of the art of electric and hybrid vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2002. **90**(2): p. 247-275.
8. Elton J. Cairns, P.A., *Batteries for Electric and Hybrid-Electric Vehicles*. Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng. , 2010: p. 299-320.
9. Rodrigues, G.B.T., *Modelação e Simulação de um Formula Student Eléctrico* 2009.
10. Kroeze, R.C. and P.T. Krein, *Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations*. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vols 1-10, 2008: p. 1336-1342.
11. E. Bertolazzi, F.B., M. Da Lio, M. Mateotti. *Hybrid vehicle optimization: lead acid battery modellization*. in *EVER09: International Conference & Exhibition on Ecological vehicles Renewable Energies*. 2009. Monaco.

12. Kumar, P. and P. Bauer. *Parameter extraction of battery models using multiobjective optimization genetic algorithms*. in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*. 2010.
13. Ribeiro, P.F., et al., *Energy storage systems for advanced power applications*. *Proceedings of the IEEE*, 2001. **89**(12): p. 1744-1756.
14. Burke, A.F., *Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles*. *Proceedings of the IEEE*, 2007. **95**(4): p. 806-820.
15. H. Gualous, G.A., *ESSCAP'2008 - Lithium Ion capacitor characterization and modeling*. 2008.
16. Weir, R.D., et al., *Fabrication of electrical energy storage unit components useful in e.g. bus involves screen-printing Teflon plastic-coated steel plate with poly(ethylene terephthalate) and alumina-coated composition modified barium titanate ceramic powder*, EESTOR INC (EEST-Non-standard). p. 1789980-A2:.
17. Lisheng, S. and M.L. Crow. *Comparison of ultracapacitor electric circuit models*. in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. 2008.
18. Vazquez, S., et al., *Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010. **57**(12): p. 3881-3895.
19. Kohler, T.P., D. Buecherl, and H.G. Herzog. *Investigation of control strategies for hybrid energy storage systems in hybrid electric vehicles*. 2009.
20. Cao, J. and A. Emadi. *A new battery/ultra-capacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles*. 2009.
21. Tao, H., J.L. Duarte, and M.A.M. Hendrix, *Multiport Converters for Hybrid Power Sources*. 2008 *IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vols 1-10, 2008*: p. 3412-3418.
22. <http://batteryuniversity.com>. [Fevereiro de 2011].
23. Van Mierlo, J., P. Van den Bossche, and G. Maggetto, *Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators*. *Journal of Power Sources*, 2004. **128**(1): p. 76-89.